



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**EFEECTO DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE SOLUCIÓN Y
ENVEJECIMIENTO EN LA ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LA
ALEACIÓN DE ALUMINIO 356.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

ANGEL MANUEL SANTILLÁN SÁNCHEZ

ASESOR: DR. ANDRÉS HERRERA VÁZQUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. en A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos LA TESIS:

“Efectos de los Tratamientos Térmicos de Solución y Envejecimiento en la Estructura y Propiedades de la Aleación de Aluminio 356”

Que presenta el pasante: SANTILLÁN SÁNCHEZ ANGEL MANUEL

Con número de cuenta: 30430651-6 para obtener el Título de: Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de abril de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Andrés Herrera Vázquez	
VOCAL	Ml. José Juan Contreras Espinosa	
SECRETARIO	Ml. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez	
1er SUPLENTE	Ml. Sergio Martín Durán Guerrero	
2do SUPLENTE	Ing. Eusebio Reyes Carranza	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/yrf

AGRADECIMIENTOS.

Le doy gracias a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para llegar hasta esta etapa de mi vida y por brindarme las experiencias necesarias para llegar a ser una persona de bien.

Agradezco a mis padres y hermanos por su amor, apoyo incondicional, sus consejos y ejemplos que me han brindado día con día; por sus desvelos, preocupaciones y sacrificios que nunca podré pagarles y que han tenido que pasar a lo largo de este camino, ya que gracias a todo esto me han convertido en el hombre que soy, ya que son parte fundamental del motor que me mueve día a día.

Te agradezco a Anitha por tu amor, tus consejos, tu alegría, tu apoyo incondicional y tu ejemplo ya que sin ti este camino hubiera sido más difícil, gracias por no soltarme y siempre alentarme e impulsarme, gracias por ser la otra parte del motor que me mueve.

Al Doctor Andrés Herrera Vázquez por la confianza brindada a lo largo del tiempo que tenemos de conocernos, por sus enseñanzas y su asesoría para poder culminar esta etapa de mi vida.

Al maestro Tomas Rangel Ortiz, Noé Alberto Cortes Guerrero y demás personal del CAT por la colaboración y facilidades brindadas para la realización de esta tesis.

A mis amigos por ser parte especial en mi vida y un agradecimiento especial a Irwin Salvador Munguía Llanas por haber sido parte fundamental para la realización de esta tesis y Ulises Ignacio Gómez Rosales por sus asesorías.

A todos mis maestros por sus enseñanzas.

DEDICATORIAS.

A mis padres porque este logro también es suyo ya que es fruto del amor, esfuerzos y enseñanzas que me han dado a lo largo de estos 25 años.

A mis hermanos que en la medida de sus posibilidades me apoyaron para terminar mi carrera.

A Anitha por haber tenido que aprender cosas de ingenieros para poder ayudarme, por convertirme algunas veces en atleta de alto rendimiento y otras en heroína para poder lograr todos aquellos trámites necesarios para poder llegar juntos al final de este camino.

A mis abuelos y familiares por ser parte de mis motivaciones, por sus ejemplos y por su influencia para ser la persona que soy.

A todos aquellos amigos que tuvieron que ver a lo largo de mi educación y formación.

ÍNDICE

	<u>OBJETIVO</u>	6
CAPITULO		
1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	6
2	<u>FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO</u>	8
	2.1 FUSIÓN	8
	2.2 REGLAS GENERALES DE FUSIÓN	8
	2.3 HORNOS UTILIZADOS EN LA FUSIÓN	9
	2.4 PRINCIPIOS DE LA SOLIDIFICACIÓN	10
	2.5 EFECTO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL MOLDE EN LA ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE UNA PIEZA FUNDIDA	15
3	<u>TRATAMIENTO TERMICO DE ALEACIONES DE ALUMINIO</u>	19
	3.1 OBJETIVO DEL TRATAMIENTO TERMICO	23
	3.2 HORNOS USADOS Y MEDIO DE ENFRIAMIENTO	26
	3.3 EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LAS PROPIEDADES Y LA ESTRUCTURA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	30
	3.4 PASOS A SEGUIR EN EL TRATAMIENTO TERMICO	33
	3.5 DEFECTOS Y FALLAS DE UN TRATAMIENTO TERMICO	36
4	<u>TRABAJO EXPERIMENTAL</u>	37
	4.1 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	37
	4.2 FUSIÓN Y MOLDEO	39
	4.3 TRATAMIENTO TERMICO	44
	4.4 MAQUINADO	46
	4.5 ENSAYO DE PROBETAS	50
	4.5.1 PRUEBA DE TENSIÓN	50
	4.5.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	51
	4.5.3 PRUEBA DE DUREZA	54
	4.5.4 ANALISIS METALOGRAFICO	56

5	<u>RESULTADOS</u>	57
5.1	ESTRUCTURAS METALOGRAFICAS	57
5.1.1	ESTRUCTURA METALOGRAFICA EN VERDE	57
5.1.2	ESTRUCTURAS METALOGRAFICAS CON TRATAMIENTO TERMICO	59
5.2	PROPIEDADES DE TENSIÓN Y DUREZA	67
6	<u>DISCUSIÓN</u>	76
	<u>CONCLUSIONES</u>	81
	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	83

OBJETIVO.

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de los tratamientos térmicos de solución y envejecimiento en la estructura y propiedades de la aleación de aluminio 356 para lo cual se consideró como variable la temperatura y el tiempo dado que esta aleación forma parte de un gran número de aplicaciones en la industria.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN.

El aluminio fue descubierto por Hunfredo Davi a comienzos del siglo XIX, en el año de 1809, pero fue hasta 1886 cuando se dio a conocer el método de aislamiento y obtención en escala comercial por los químicos Carlos Martin Hall y Pablo L. T. Heroult, en los Estados Unidos y Francia respectivamente, casi simultáneamente.

En la actualidad el aluminio es un metal muy usado por su densidad y sus características mecánicas con elementos aleados. El aluminio es el metal más abundante en la Tierra y en la Luna, pero nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza, se halla ampliamente distribuido en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de alúmino silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos. En esas condiciones se forman las bauxitas que sirven de materia prima fundamental en la producción de aluminio. Elemento químico metálico, de símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26.9815g/mol, que pertenece al grupo IIIA de la Tabla Periódica. El aluminio puro es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede formar aleaciones con otros elementos para aumentar su resistencia y adquirir varias propiedades útiles. Las aleaciones de aluminio son ligeras, fuertes, y de fácil formación para muchos procesos de conformado; son fáciles de ensamblar, fundir o maquinar y aceptan gran variedad de acabados. Por sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso.

ALEACIONES DE ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por la relativamente baja densidad (2.7 g/cm^3 comparada con 7.9 g/cm^3 del acero), elevadas conductividades eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. A muchas de estas aleaciones se les puede dar formas diferentes con facilidad debida a su elevada ductilidad; esto es evidente en el aluminio puro, que se puede convertir en papel y enrollar. El aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es la baja temperatura de fusión (660°C), que restringe su campo de aplicación. La

resistencia mecánica del aluminio se logra por acritud y por aleación; sin embargo ambos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión. Los principales elementos de aleación son cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc. Algunas de las aplicaciones más comunes de las aleaciones de aluminio son: partes estructurales de los aviones, latas para bebidas refrescantes, partes de las carrocerías de autobuses y de los automóviles (culatas, pistones y colectores de escape). Actualmente se presta mucha atención a las aleaciones de aluminio y de otros metales de baja densidad (Mg, Ti) como materiales utilizados en los transportes, debido al efecto de ahorro de combustible. Una importante característica de estos materiales es la resistencia específica, cuantificada como la relación entre resistencia a la tracción y densidad. Aunque una aleación de estos metales tenga una resistencia a la tracción inferior a la de un material más denso (acero), para un peso determinado puede aguantar una carga mucho mayor.

La aleación 356 es una aleación aluminio-silicio hipo eutéctica debido a que su contenido de 7.0% de silicio en peso es inferior a la del punto eutéctico en un sistema aluminio-silicio. Esta aleación es ampliamente utilizada para la fabricación de componentes de alta resistencia para aplicación automotriz, aeroespacial y militar ya que ofrece una combinación de alta resistencia mecánica, moldeabilidad y resistencia a la corrosión tanto en la fundición en arena como en molde permanente.

Sin embargo, esta aleación se utiliza muy poco en el estado bruto de colada, sin ningún tratamiento previo, ya que presenta propiedades mecánicas relativamente pobres debido a la presencia de silicio eutéctico en forma de placas gruesas que producen tensiones internas.

El tratamiento químico y el tratamiento térmico son los dos procesos principales que se utilizan para mejorar las propiedades de esta aleación. El tratamiento químico, también conocido como modificación, es un proceso de estado líquido que se logra mediante la adición de pequeñas cantidades de sodio o estroncio a la masa fundida y produce como resultado un cambio de la morfología de la fase de silicio eutéctico de grueso a fino fibroso, que se traduce en una mejora de las características mecánicas.

En cuanto al tratamiento térmico, este es un proceso usado para obtener una combinación deseada de propiedades mecánicas (resistencia y ductilidad). El más común es el T6, que consiste en un tratamiento térmico de solución, temple y envejecimiento.

El tratamiento térmico de solución, por lo general, se lleva a cabo a una temperatura ligeramente por debajo de la temperatura eutéctica aproximadamente 540 °C durante 4 a 8 horas. Este tratamiento disuelve elementos (Mg y Si) en la matriz de Al, homogeniza la fundición y esferoidiza el silicio eutéctico. Después del tratamiento de solución, las piezas de fundición deben ser templadas con el fin de evitar la precipitación de elementos disueltos y para crear una solución sólida sobresaturada, una condición esencial para su posterior envejecimiento.

CAPITULO 2

FUSION Y SOLIDIFICACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO.

2.1 FUSIÓN

La fusión se puede definir como un proceso físico-químico que consiste en el cambio de estado de la materia del estado sólido al estado líquido por la acción del calor. El proceso de fusión de los materiales está intrínsecamente incluido en el de fundición.

El proceso de fundición consiste en la fabricación de piezas a partir de fundir un material e introducirlo en un molde construido siguiendo la forma de la pieza a manufacturarse, Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Cuando el material fundido en el molde empieza a enfriarse hasta la temperatura suficiente para el punto de congelación de un metal puro, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. El metal adopta la forma de cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición. Al enfriarse la fundición se remueve del molde.

Una fusión adecuada del aluminio deberá proporcionar un metal con composición correcta, ausencia de óxido y un contenido de gases suficientemente bajo, además de un tamaño de grano fino. Si el procedimiento de fusión no es el adecuado, se obtendrá un metal con malas características, ya que las características del aluminio al estar en estado líquido durante la fusión son: tendencia a la fácil oxidación, a la absorción de gases y a disolver pequeñas cantidades de hierro de difícil eliminación posterior.

En ocasiones las fallas en la composición química pueden deberse a heterogeneidad del baño por falta de un mezclado adecuado (desplazamiento del metal del fondo hacia arriba) durante el mantenimiento del metal y antes de la colada o debido al enriquecimiento o empobrecimiento de un elemento por altas temperaturas y tiempos de mantenimiento prolongados durante el proceso de fusión o como consecuencia de refusiones sucesivas, lo cual además puede llegar a provocar un tamaño de grano tosco.

2.2 REGLAS GENERALES DE FUSIÓN

El principio de fundición es simple: se funde el metal, se vacía en un molde, se deja enfriar y se extrae la pieza, existen todavía muchos factores y variables que se deben considerar para lograr una operación exitosa de fundición; es decir la obtención de un metal fundido de calidad. A continuación se proporcionan algunas reglas generales referentes al procedimiento de fusión:

- Fundir en un tiempo mínimo.
- Evitar todo sobrecalentamiento y la permanencia a elevada temperatura de la aleación, llevando un control por medio de un termopar o pirómetro.
- Evitar toda presencia de humedad en cualquiera de los objetos con los que tenga que estar en contacto el metal o material fundido es decir; los crisoles, el refractario, las herramientas de fusión, el metal, el fundente, el molde, etc.
- Los lingotes a cargar en el horno deben de estar limpios; sin humedad, grasa u oxidados.
- Evitar todos los movimientos inútiles en la superficie del baño; quitar las escorias solo cuando sea necesario.
- Reducir al mínimo la altura de caída del metal fundido durante los trasvasados y durante la colada.
- Utilizar preferentemente crisoles de carburo de silicio o de grafito, evitando el empleo de crisoles de hierro fundido.
- Las herramientas de hierro deben de ser cuidadosamente revestidas con pintura refractaria y precalentadas.

2.3 HORNOS UTILIZADOS EN LA FUSIÓN.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y tamaño, varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto de hasta 200 toneladas de capacidad.

El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinado por los siguientes factores:

- La necesidad de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a temperatura de vaciado requerida (rendimiento elevado).
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.

- La producción requerida del horno.
- El tipo de trabajo ya sea continuo o intermitente
- El costo de operación del horno, es decir debe tener una mínima pérdida de calor, un mínimo consumo de energía y una mínima mano de obra de conducción y supervisión.
- La precisión y uniformidad en la temperatura de trabajo

Los tipos de hornos que se usan en un proceso de fundición son:

- Horno de crisol móvil, estacionario y basculante
- Horno eléctrico.
- Horno por inducción.
- Horno de arco eléctrico.
- Horno basculante.
- Horno de cubilote.

2.4 PRINCIPIOS DE LA SOLIDIFICACIÓN

La solidificación es un proceso de transformación del estado líquido al sólido, el cual se inicia por un agrupamiento de átomos en una forma ordenada dentro de un líquido y que se forma a expensas de ese mismo líquido, involucrando consecuentemente un cambio de estructura. Este proceso ocurre por la nucleación y crecimiento de una fase nueva, es decir, la estructura cambia repentinamente frente a la interfase sólido-líquido que se forma.

En el caso de aleaciones, además de haber un cambio de estructura en la solidificación, hay un cambio en la composición del sólido cristalizado con respecto a la del líquido.

La solidificación es posiblemente la transformación más importante en la metalurgia, dado que casi todos los metales comerciales se producen en estado líquido por recuperación o refinación, siendo solidificados para su uso posterior, esto es debido a que la mezcla de solutos

ocurre solo por difusión, y esta es tan lenta que se considera generalmente despreciable, mientras que en estado líquido la mezcla ocurre por difusión y convección, con lo cual se puede obtener rápidamente un material muy homogéneo y solidificarlo para su uso posterior.

La solidificación es un cambio de fase que se lleva a cabo a través de la nucleación y crecimiento del metal o aleación solidificando. La nucleación puede ser homogénea o heterogénea.

Conforme se reduce la fuerza impulsora de la transferencia térmica al alejarse de las paredes del molde, los granos se hacen equiaxiales y grandes. Aquellos granos que tengan orientaciones sustancialmente distintas quedan bloqueados contra un crecimiento adicional. Este desarrollo de los granos se conoce como nucleación homogénea, lo que quiere decir que los granos crecen sobre sí mismos, dentro del seno del mismo líquido.

Las impurezas en el líquido proporcionan a menudo los sitios fáciles de nucleación, por esta razón se agregan a menudo inoculantes para aumentar el número de núcleos y por lo tanto para reducir el tamaño de grano.



Figura 1. Se muestra el tamaño de grano sin elementos inoculantes y el efecto de refinamiento de grano que causa el inoculante TiB_2 .

Se le llama nucleación heterogénea o nucleación inducida cuando la nueva fase, se forma preferencialmente en inhomogeneidades en la fase madre, debido a la disminución de la energía libre necesaria para que el proceso ocurra, el comienzo del embrión es en forma de un casquillo (media esfera), que por lo regular se forma en las paredes del molde o superficies de partículas

inoculantes. Los límites de grano proporcionan importantes sitios de nucleación heterogénea en transformaciones en estado sólido, durante tratamientos térmicos o termomecánicos y es precisamente este tipo de nucleación la que ocurre en la mayoría de los procesos industriales ya que a nivel industrial es muy común el uso del inoculante como agente de nucleación ya que proporciona o ayuda a acercarse a la estructura y características deseadas más rápido y a un menor costo.

Podemos decir que los bordes de grano son sitios potenciales para la nucleación de una transformación en estado sólido y pueden dar un control en el desarrollo de la microestructura y propiedades del material. Al igual otros importantes sitios de nucleación son las interfaces y las dislocaciones.

Cuando un metal fundido se cuele en un molde frío, el metal adyacente a la pared del molde, es enfriado rápidamente y muchos granos nuclean, los cuales crecen dendríticamente desde el líquido enfriado. Los primeros granos crecen desde un líquido enfriado cercano a la pared del molde, originando que el contenido de soluto pueda llegar a acumularse rápidamente en la rama principal de la dendrita. Al calentarse la pared del molde, aumenta la temperatura del sólido que crece, mientras que la rapidez de crecimiento disminuye, teniendo más cantidad de soluto la oportunidad de difundirse, por lo que la concentración del sólido en formación disminuye. De esta manera, hay una disminución en la concentración de soluto al ir de la rama principal de la dendrita a los brazos que crecen a una mayor temperatura. Este calentamiento, continuado por el líquido caliente pone a la dendrita a una temperatura superior a la de sólidos, para la composición de la parte exterior de las primeras dendritas formadas, aunque por debajo del líquido de esta composición. El calor de cristalización eliminado, más el calor que fluye del líquido caliente, eliminan el enfriamiento inicial en el líquido cercano al molde y la rapidez de solidificación disminuye. Como el líquido en el centro del molde se encuentra con una temperatura superior a la del líquido, no pueden desarrollar granos ahí, de manera que, únicamente los granos de la pared del molde continúan creciendo hacia el líquido. Los granos que han nucleado en la zona llamada "zona enfriada", contigua al molde, tienen un tamaño pequeño. De estos granos, aquellos con su dirección de crecimiento dendrítico normal a la pared del molde crecerán más rápidamente, desarrollándose así una zona columnar que posee una textura cuyo tamaño de grano aumenta con la distancia desde la pared, creciendo estas dendritas bien orientadas tan rápido como el calor de cristalización pueda fluir lejos de la pared del molde.

Existe una tercera zona en el centro del molde, que solidifica y que consiste de granos casi esféricos llamados equiaxiales, los cuales pueden crecer solo cuando el líquido en el centro del molde se ha enfriado por debajo de su temperatura de líquido. Los puntos de nucleación para este tipo de granos son proporcionados normalmente por los brazos de dendritas, arrancados por fusión de las dendritas iniciales y que son empujados al centro del molde.

Si se cuela una aleación a temperatura ligeramente superior a la del líquido en un molde frío, todo el líquido se enfriará por debajo de la temperatura del líquido durante el colado, siendo arrancados los brazos de la dendrita, por fusión de las dendritas iniciales y por el movimiento convectivo del líquido, y nuevamente empujados hacia el centro del molde, solo que, en este caso, esas partículas flotantes no se funden, sino que crecen dendríticamente en todas direcciones con una rapidez determinada por la rapidez de eliminación de calor. Esta creación de muchos núcleos durante el colado, ninguno de los cuales se funde, produce un grano fino. El rápido enfriamiento de todo el líquido en el molde, por debajo de su líquido, es facilitado por una temperatura de colado ligeramente superior a la del líquido (pequeño sobrecalentamiento), un molde frío de buena conductividad térmica y una pieza delgada.

La estructura que resulta de colar una aleación desde una temperatura muy superior a la del líquido, es una zona equiaxial bastante burda en la parte central, mientras que en los lados, crecen granos columnares de manera dendrítica hacia el líquido, hasta que el centro está lleno de dendritas equiaxiales.

Se ha establecido por muchos investigadores, que la vibración mecánica del molde durante la solidificación frecuentemente refinara el grano y reducirá o eliminará la estructura columnar.

Para el caso de una aleación cuyo diagrama de fases indica la existencia de reacciones eutécticas (un mínimo en la temperatura líquida), por ejemplo el diagrama de fases para el sistema aluminio-silicio (figura 2), la solidificación ocurre como sigue: sean A y B, el aluminio y el silicio respectivamente, los dos elementos que forman el diagrama de fases, y (α) y (β) las dos fases sólidas, si una aleación rica en A es enfriada, la cristalización comienza con la formación y crecimiento de dendritas de α (llamadas α primario). Al crecer estas dendritas, el porcentaje de B en el líquido aumenta (debido a la redistribución del soluto), hasta que está suficientemente sobresaturado de B como para nuclear β , creciendo entonces $\alpha + \beta$ juntos, a esta reacción se le denomina solidificación eutéctica. En un eutéctico las dos fases pueden tener diferentes morfologías como puede apreciarse en la figura 3.

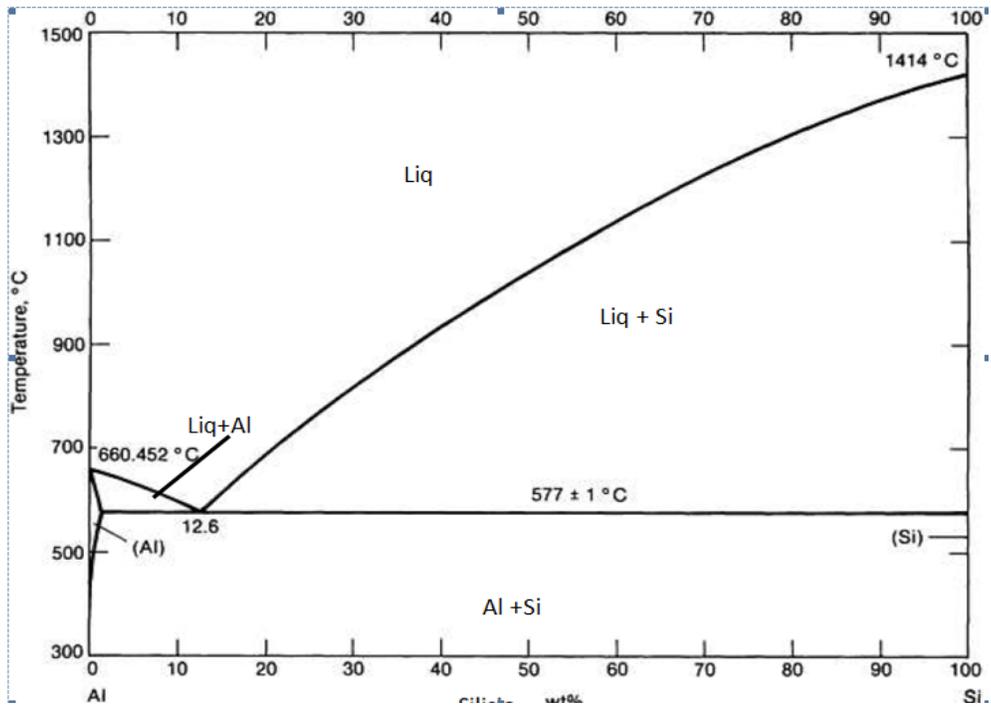


Figura 2. Diagrama de equilibrio Aluminio-Silicio.

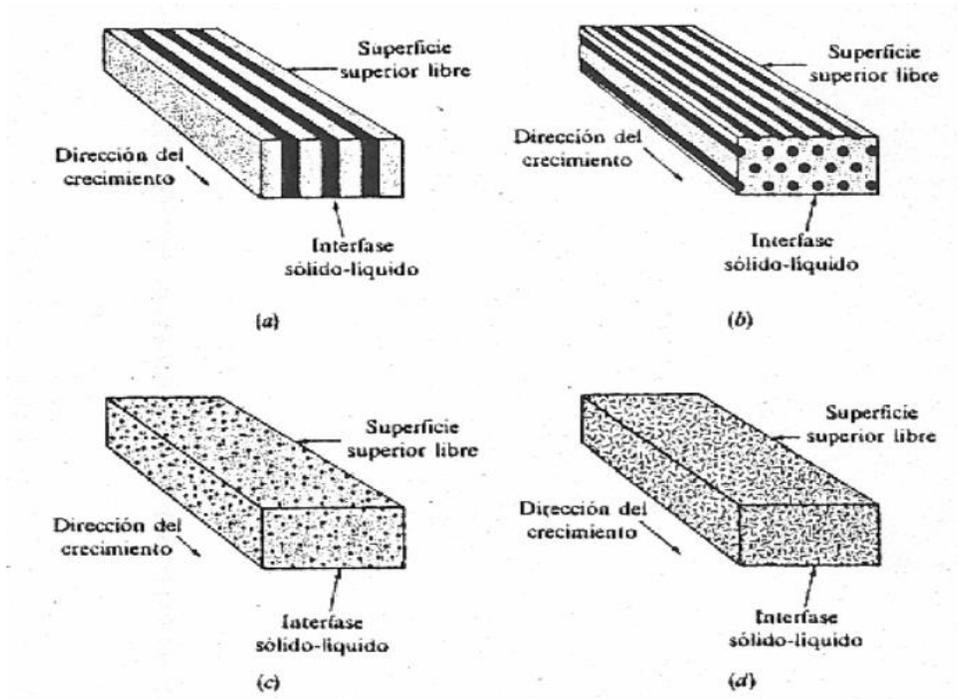


Figura 3. Ilustración esquemática de las diferentes morfologías de la estructura eutética. (a) Laminar; (b) varillas; (c) globular; (d) acicular.

2.5 EFECTO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL MOLDE EN LA ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE UNA PIEZA FUNDIDA.

Después que un metal fundido es vaciado en un molde, ocurren una serie de eventos durante la solidificación de la fundición y su enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Estos eventos influyen de manera importante el tamaño, forma, uniformidad y composición química de los granos formados en toda la fundición lo que a su vez tiene influencia sobre sus propiedades generales. Los factores de significación que afectan a estos eventos son el tipo de metal; las propiedades térmicas y metalúrgicas tanto del metal como del molde; la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la fundición; y la forma y tipo del molde ya que afecta la velocidad de enfriamiento del metal dentro del molde y el flujo del fluido. También se describen factores que tienen influencia en la formación de defectos.

El principal efecto de la conductividad térmica del molde recae en el tiempo de solidificación, es decir la velocidad con la que el metal tardara en pasar del estado líquido al estado sólido, por ejemplo, si la conductividad térmica del molde es elevada, el calentamiento del molde mejorara la fluidez del metal fundido a través de él pero a su vez alargara el tiempo de solidificación del metal; esto quiere decir que la conductividad térmica del molde al ser factor en la solidificación juega un gran papel en el desarrollo de las estructuras y del tamaño de grano resultante, a su vez las estructuras y el tamaño de grano influyen las propiedades de la fundición, por ejemplo, conforme se reduce el tamaño de grano, se incrementa la resistencia y ductilidad de la aleación fundida, se reduce la microporosidad (huecos de contracción interdendríticos) en la fundición y disminuye la tendencia de la pieza fundida a agrietarse (desgarramiento en caliente) durante la solidificación. La falta de uniformidad en el tamaño y en la distribución del grano dan como resultado fundiciones con propiedades anisotrópicas, es decir, que pueden presentar diferentes características según la dirección en la que se examinen esto afecta a las propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas de los materiales.

En muchas aleaciones coladas comerciales el rango de solidificación es amplio y el gradiente de temperatura en las últimas etapas de solidificación es bajo. De esta manera, un gran volumen de la pieza estará a una temperatura entre la de líquidos y la del sólido, a la cual el metal consiste de una mezcla de partículas dendríticas que crecen hacia el líquido remanente. Esta mezcla pastosa de partículas y líquido no fluye ni se asienta para compensar la contracción provocada por la solidificación. A consecuencia de esto se produce un pequeño hueco y la contracción aparece como una microporosidad bastante uniformemente distribuida en la superficie de la pieza. Por otro lado, los gases disueltos en el metal líquido tendrán mucha menos solubilidad en el sólido y tenderán a incrementar la microporosidad. En muchas aplicaciones esta fina porosidad no causa problemas, sin embargo, si una pieza colada va a usarse para encerrar un

fluido al alta presión, tal porosidad suministra trayectorias casi continuas a través del sólido, lo que permite que el fluido se transmita a través de la pieza, pudiendo causar su fractura.

Dado que se espera que todas las fundiciones tengan ciertas propiedades para que cumplan con los requerimientos de diseño y de servicio, son importantes aspectos de la fundición, las relaciones existentes entre las propiedades y las estructuras desarrolladas durante la solidificación. Estas relaciones se describen en función a la morfología de las dendritas y a la concentración de los elementos de aleación en varias regiones.

La composición de las dendritas y del metal líquido está dada por el diagrama de fase de la aleación particular. Cuando se enfría la aleación muy lentamente, cada dendrita desarrolla una composición uniforme. Bajo las velocidades normales (más rápidas) de enfriamiento que se encuentran en la práctica, sin embargo, se forman dendritas nucleadas. Las dendritas nucleadas tienen una composición superficial distinta a la de sus núcleos (esta diferencia se conoce como gradiente de concentración).

La microsegregación se presenta cuando la superficie tiene una concentración más alta de elementos de aleación del núcleo de la dendrita, debido al rechazo de soluto del núcleo hacia la superficie durante la solidificación de la dendrita. El sombreado más oscuro en el líquido interdendritico cerca de las raíces de la dendrita en la figura 4 indica que esas regiones tienen una concentración más elevada de soluto; en esas regiones la microsegregación es mucho más pronunciada que en otras.

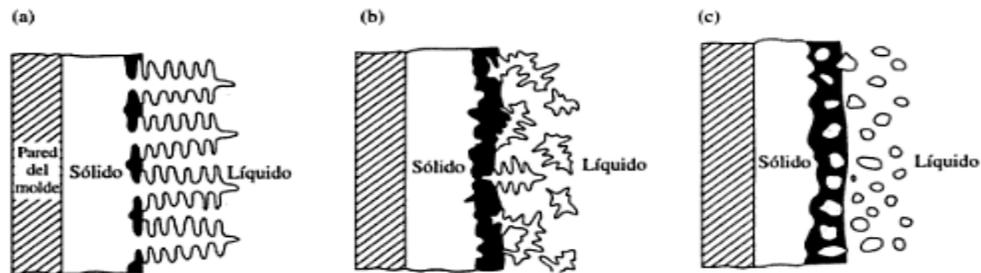


Figura 4. Ilustración esquemática de tres tipos básicos de estructuras fundidas: (a) dendrítica columnar; (b) dendrítica equidimensional; (c) no dendrítica equiaxiales.

Existen varios tipos de segregación. A diferencia de la microsegregación, la macrosegregación involucra diferencias en composición en toda la pieza fundida. En situaciones donde el frente de solidificación se aleja de la superficie de una fundición como un frente plano

(figura 5), los constituyentes con menor punto de fusión en la aleación en solidificación son empujados hacia el centro a esto se le conoce como segregación normal. En consecuencia este tipo de fundición tiene una mas elevada concentración de elementos de aleación en su centro que en sus superficies.

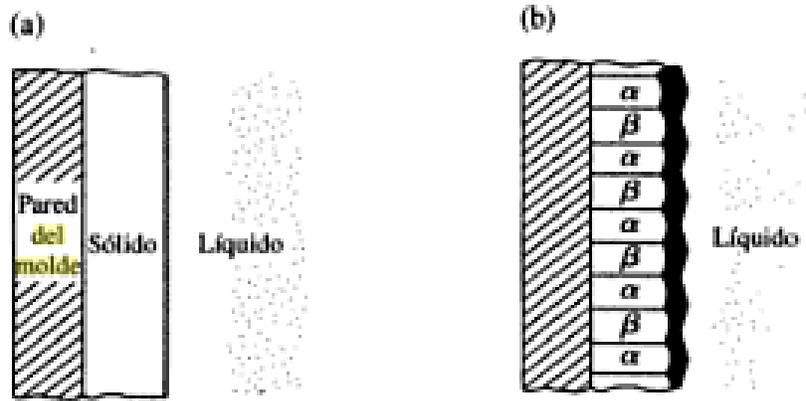


Figura 5. Ilustración esquemática de estructuras fundidas en (a) frente plano, una fase, y (b) frente plano, dos fases.

En estructuras dendríticas como las que se encuentran en las aleaciones de solución sólida, ocurre lo contrario: el centro de la fundición tiene una menor concentración de elementos de aleación a esta segregación se le conoce como segregación inversa. La razón está en que el metal líquido (que tiene una concentración más alta de elementos de aleación) entra en las cavidades desarrolladas debido a contracción por solidificación en los brazos dendríticos, que se han solidificado con anterioridad.

Otra forma de segregación es debida a la gravedad. La segregación por gravedad describe al proceso mediante el cual las inclusiones o compuestos de densidad más elevada se hunden, y los elementos más ligeros flotan hacia la superficie.

Debido a la presencia de gradientes térmicos en una masa en solidificación de metal líquido y debido a la gravedad y a las diferencias resultantes en densidad, la convección tiene una fuerte influencia sobre las estructuras que se desarrollan. La convección promueve la formación de una zona de enfriamiento exterior; refina el tamaño de grano; y acelera la transición de granos columnares a equiaxiales. La estructura que se muestra en la figura 5 (b) también se puede obtener incrementando la convección dentro del metal líquido, y por ende los brazos dendríticos se separan (multiplicación de dendritas). Por otra parte, la reducción o eliminación de la convección da como resultado granos columnares dendríticos mal largos y más grandes.

Los brazos dendríticos no son particularmente fuertes y en las primeras etapas de la solidificación se pueden romper por agitación o vibración mecánica. Este proceso da como resultado un tamaño de grano mas fino, con granos no dendríticos equiaxiales distribuidos mas uniformemente en toda la fundición. Se puede aumentar la convección usando metodos mecánicos o electromagnéticos.

En conclusión podemos decir que la transferencia de calor merece una consideración de importancia durante el ciclo completo desde el vaciado hasta la solidificación y el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. El flujo de calor en diferentes sitios del sistema es un fenomeno complejo, y depende de muchos factores relacionados con el material de fundición y los parametros del molde y del proceso. Por ejemplo, en la fundición de secciones delgadas, la velocidad de flujo de metal debe ser lo suficientemente alta para evitar un enfriamiento y solidificación prematuros. Sin embargo, la velocidad de flujo no debe ser tan alta que cause excesiva turbulencia con sus efectos nocivos en el proceso de fundición.

CAPITULO 3

TRATAMIENTO TERMICO DE ALEACIONES DE ALUMINIO.

El aluminio puede alearse con varios elementos con lo que resulta de una mayor resistencia a la tracción y de una mayor dureza. En algunas aleaciones, puede incrementarse posteriormente la resistencia a la tracción mediante un tratamiento térmico adecuado. Los elementos con los que se alea generalmente son el cobre, el silicio, el magnesio, el manganeso, el cromo y el cinc.

Las aleaciones de aluminio pueden ser clasificadas en términos de tratamiento térmico en dos categorías básicas: no tratables térmicamente y tratables térmicamente. Las aleaciones no tratables térmicamente o aleaciones comunes, contienen elementos de aleación que quedan sustancialmente en solución sólida o que son insolubles a cualquier temperatura.

Las aleaciones tratables térmicamente o aleaciones fuertes contienen elementos de aleación que tienden a incrementar la solubilidad sólida a elevadas temperaturas con restringida solubilidad a bajas temperaturas, lo cual hace posible someter estas aleaciones a tratamiento térmico, el cual les aumentara su resistencia considerablemente. La experiencia indica que solo las aleaciones Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Si-Mg y Al-Zn-Mg aumentan sus características mecánicas por tratamiento térmico.

La influencia de los elementos de aleación en el aluminio son los siguientes:

- Cobre: Aumenta de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, tanto en condiciones de extrusión como tratado térmicamente. Las aleaciones que contienen de 4 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico. Por lo general, el cobre reduce la resistencia a la corrosión y, en ambientes muy específicos en ciertos tipos de aleaciones, induce a la corrosión bajo tensión. Las adiciones de cobre reducen la resistencia al agrietamiento en caliente y disminuye la colabilidad en piezas fundidas.
- Hierro: Mejora la resistencia al agrietamiento en caliente, la resistencia a la fluencia a altas temperaturas y disminuye la tendencia a la adhesión en fundición a presión. El hierro refina el grano en los lingotes de fundición. Un incremento en el contenido de hierro aumenta la resistencia mecánica pero disminuye notablemente la ductilidad, por la presencia de las segundas fases. En presencia de altos contenidos de hierro, dichas fases afectan adversamente la colabilidad y las características de alimentación de las piezas fundidas. Junto con el manganeso y el cromo, el hierro ayuda a formación de fases que pueden retirarse por escoriación de la colada.
- Magnesio: Mejora notablemente la resistencia y la dureza en las aleaciones Al-Si tratadas térmicamente normales o en aquellas más complejas que tienen elementos como el Cu, Ni

y otros elementos. Las composiciones recomendadas para aluminios de alta calidad ("Premium") varían en el rango de 0,40 a 0,70%. Las aleaciones binarias Al-Mg se utilizan ampliamente cuando se requiera un acabado superficial brillante, buena resistencia a la corrosión y una excelente combinación entre resistencia y ductilidad. Las composiciones entre 4 a 10% Mg, así como aquellas que contienen más de 7% Mg son tratables térmicamente, cuya desventaja principal es la inestabilidad en las características de envejecimiento a temperatura ambiente.

- **Manganeso:** Incrementa la resistencia mecánica sea por solución sólida o por finos precipitados intermetálicos. No altera la resistencia a la corrosión. Se usa en la fundición para corregir la forma acicular de los precipitados ricos en hierro y disminuir su efecto fragilizante, aunque promueve una estructura fibrosa en los lingotes. En forma de precipitados finos previene el crecimiento del grano en la recristalización. Se encuentra que el manganeso incrementa la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente. Reduce la calidad de embutición. En presencia de Fe, Cr o Ni, debe cuidarse que no sobrepasen los límites de composición para evitar la formación de cristales primarios intermetálicos.
- **Níquel:** Se emplea conjuntamente con el cobre para mejorar las propiedades a altas temperaturas. También reduce el coeficiente de expansión térmica.
- **Silicio:** El efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del colado, mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las piezas fundidas. Las aleaciones comerciales Al-Si varían desde composiciones hipoeutécticas hasta cerca del 25% Si. Para procesos de colado con velocidades lentas de solidificación se prefieren los rangos de 5 a 7 % Si, para moldes permanentes se recomienda 7 a 9 % Si y para fundición a presión, que inducen altas velocidades de enfriamiento, 8 a 12% Si. Se recomienda mayores cantidades de eutéctico para propósitos de alimentación de la pieza a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento. Las adiciones de silicio disminuyen la densidad y el coeficiente de expansión térmica.
- **Estaño:** Mejora las características antifricción y la maquinabilidad. Debido a esto, se utiliza en aleaciones destinadas a cojinetes. El estaño puede influenciar la respuesta al endurecimiento de ciertas aleaciones de aluminio.
- **Titanio:** Refina la estructura del grano del aluminio, usualmente adicionado como boruro de titanio, TiB₂, preferiblemente en concentraciones mayores que la estequiométrica. Reduce la tendencia al agrietamiento.
- **Cinc:** No se reportan beneficios por la adición del cinc al aluminio. Sin embargo, en aleaciones que contienen Cu y/o Mg, mejora la respuesta al endurecimiento por tratamiento térmico o natural.

- Cromo: Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- Escandio: Mejora la soldadura.

Las aleaciones de aluminio (tanto las forjadas como las moldeadas) se clasifican en función del elemento aleante usado (al menos el que este en mayor proporción).

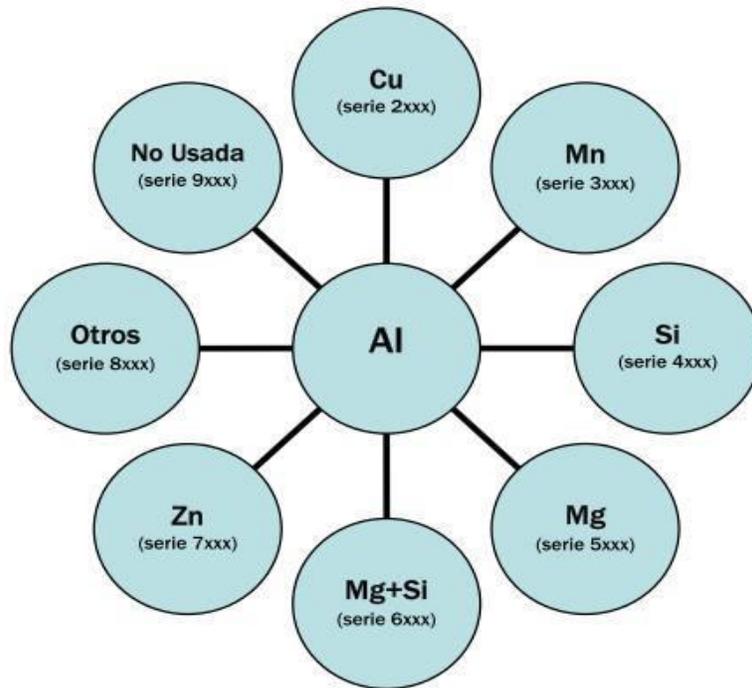


Figura 6. Clasificación de las aleaciones de aluminio según el elemento aleante usado.

SERIE 2XXX.

En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Cu, pero a veces también se le añade Mg. Las características de esta serie son: buena relación dureza-peso y mala resistencia a la corrosión. En lo referente a la primera característica decir que algunas de las aleaciones de esta serie tienen que ser sometidas a TT de solubilidad y a veces de envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas. Una vez hecho esto la serie 2xxx tiene unas propiedades mecánicas que son del orden y, a veces superiores que las de los aceros bajos en carbono. El efecto de los TT es el aumento de la dureza con una bajada de la elongación. En lo referente a la segunda característica estas aleaciones generalmente son galvanizadas con aluminio de alta pureza o con aleaciones de la serie 6xxx para protegerlas de la corrosión y que no se produzca corrosión intergranular. Los usos más frecuentes que se le dan a estos aluminios son (generalmente son usados en lugares donde sea necesario una alta relación dureza-peso) en las ruedas de los camiones y de los aviones, en la suspensión de los camiones, en el fuselaje de los aviones, en

estructuras que requieran buena dureza a temperaturas superiores a 150 °C, para finalizar decir que salvo la aleación 2219 estas aleaciones tienen una mala soldabilidad pero una maquinabilidad muy buena.

SERIE 3XXX.

En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Mn. Estas aleaciones tan solo tienen un 20% más de dureza que el aluminio puro. Eso es porque el Mn solo puede añadirse de forma efectiva en solo un 1.5%. Por ello hay muy pocas aleaciones de esta serie. Sin embargo los aluminios 3003, 3x04 y 3105 son muy usados para fabricar utensilios que necesiten dureza media y que sea necesario buena trabajabilidad para fabricarlos como son botellas para bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, tejados y otras aplicaciones arquitectónicas.

SERIE 4XXX.

En esta serie el principal elemento aleante es el Si que suele añadirse en cantidades medianamente elevadas (por encima del 12%) para conseguir una bajada del rango de fusión de la aleación. El objetivo es conseguir una aleación que funda a una temperatura más baja que el resto de aleaciones de aluminio para usarlo como elemento de soldadura. Estas aleaciones en principio no son tratables térmicamente pero si son usadas en soldadura para soldar otras aleaciones que son tratables térmicamente parte de los elementos aleantes de las aleaciones tratables térmicamente pasan a la serie 4xxx y convierten una parte de la aleación en tratable térmicamente. Las aleaciones con un elevado nivel de Si tienen un rango de colores que van desde el gris oscuro al color carbón y por ello están siendo demandadas en aplicaciones arquitectónicas. La 4032 tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y una alta resistencia al desgaste lo que la hace bien situada para su uso en la fabricación de pistones de motores.

SERIE 5XXX.

Esta serie usa como principal elemento aleante el Mg y a veces también se añaden pequeñas cantidades de Mn cuyo objetivo es el de endurecer el aluminio. El Mg es un elemento que endurece más el aluminio que el Mn (un 0.8 de Mg produce el mismo efecto que un 1.25 de Mn) y además se puede añadir más cantidad de Mg que de Mn. Las principales características de estas aleaciones son una media a alta dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en ambiente marino y una baja capacidad de trabajo en frío. Estas características hacen que estas aleaciones se usen para adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos, en el hogar, iluminación de las calles y carreteras, botes, barcos y tanques criogénicos, partes de puentes grúa y estructuras de automóviles.

SERIE 6XXX.

En estas aleaciones se usan como elementos aleantes el Mg y el Si en proporciones adecuadas para que se forme el Mg_2Si . Esto hace que esta aleación sea tratable térmicamente. Estas aleaciones son menos resistentes que el resto de aleaciones, a cambio tiene también formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones pueden moderarse por un TT T4 y endurecido por una serie de acciones que completen el TT T6. Su uso suele ser el de aplicaciones arquitectónicas, cuadros de bicicletas, pasamanos de los puentes, equipo de transporte y estructuras soldadas.

SERIE 7XXX

El Zn añadido en proporciones que van desde el 1 al 8 % es el elemento aleante en mayor proporción en estas aleaciones. A veces se añaden pequeñas cantidades de Mg para hacer la aleación tratable térmicamente. También es normal añadir otros elementos aleantes como Cu o Cr en pequeñas cantidades. Debido a que la principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza se suele usar en las estructuras de los aviones, equipos móviles y otras partes altamente forzadas. Debido a que esta serie muestra una muy baja resistencia a la corrosión bajo tensión se le suele aplicar levemente un TT para conseguir una mejor mezcla de propiedades.

3.1 OBJETIVO DEL TRATAMIENTO TERMICO.

Se define como tratamiento térmico al conjunto de operaciones o ciclos de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión, etc., de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales unas características mecánicas concretas, mediante un proceso de calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada.

Los tratamientos térmicos tratan de proporcionar a la pieza tratada características como las siguientes:

- a) Obtener una estructura uniforme en toda la pieza.
- b) Lograr estabilidad dimensional.
- c) Eliminar tensiones internas causadas por la contracción del metal durante la solidificación.
- d) Mejorar la resistencia a la corrosión y la resistencia mecánica de la aleación.

e) Ablandar la aleación para mejorar su conformabilidad o forjabilidad.

A continuación se presentan las principales designaciones dictadas por la American Society for Metals (ASM) para la nomenclatura de los tratamientos térmicos haciendo una breve descripción de cada una de ellas:

F: Estado bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación. Aplicable para productos de procesos de conformado en los cuales no se emplea un control especial sobre las condiciones térmicas o el endurecimiento por deformación. No hay límites en las propiedades mecánicas para productos de forja.

O: Recocido. Se aplica a materiales ya sea de forja como de fundición que han sufrido un recocido completo. El producto es recocido completamente para obtener la menor resistencia posible.

O1: Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.

O2: Sometido a tratamiento termomecánico.

O3: Homogeneizado. Esta designación se aplica a los alambres y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura.

W: tratado térmicamente a solución. Este es un temple inestable aplicable únicamente para aquellas aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento térmico de solución. La designación se especifica únicamente cuando el periodo de envejecimiento natural está indicado, por ejemplo: W ½ hr= "W"+ ½ hr de envejecimiento natural.

H: Endurecido por deformación (únicamente para productos de forja). Se aplica a productos los cuales tienen su resistencia incrementada por endurecimiento por deformación con o sin tratamiento térmico suplementario para producir alguna reducción en la resistencia. La H va siempre seguida de dos o más dígitos.

H1. Endurecido por deformación únicamente. Se aplica a productos los cuales son endurecidos por deformación para obtener la resistencia deseada sin ningún tratamiento térmico suplementario. El número siguiente a esta designación indica el grado de endurecimiento por deformación.

H2. Endurecido por deformación y parcialmente recocido. Se aplica a productos los cuales han sido endurecidos por deformación más de lo deseado y se les aplica un recocido parcial para reducir la resistencia al nivel deseado. Para aleaciones que se ablandan al envejecer a temperatura ambiente, la designación H2 tiene el mismo valor mínimo de resistencia a la tensión que el correspondiente a la designación H3. Para las demás aleaciones, la designación H2 tiene la misma resistencia a la tensión mínima que la correspondiente a la designación H1 y una elongación un poco mayor. El número siguiendo a esta designación indica el grado de

endurecimiento por deformación que queda en el producto después de que ha sido parcialmente recocido.

H3. Endurecido por deformación y estabilizado. Se aplica a productos que son endurecidos por deformación y sus propiedades mecánicas son estabilizadas por un tratamiento térmico a baja temperatura, el cual disminuye un poco la resistencia a la tensión y aumenta la ductilidad. Esta designación es aplicable únicamente a aquellas aleaciones las cuales, a menos que hayan sido estabilizadas, gradualmente se ablandan al envejecer a temperatura ambiente. El número siguiente a la designación (0-8) indica el grado de endurecimiento por deformación antes del tratamiento de estabilización.

H4. Acritud y lacado o pintado. Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o laca dada. En esta clasificación se usa un segundo dígito (en ocasiones es necesario un tercer dígito) que indica el grado de endurecimiento por deformación.

T: Denomina a materiales que han sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación suplementario para producir efectos estables distintos de F, O o H (endurecidos por deformación). La T va siempre seguida por uno o más dígitos. Las designaciones de W y T solo se aplican a aleaciones de aluminio de forja o de fundición que sea termotratables.

T1: Enfriamiento desde una temperatura elevada de un proceso de conformado y envejecimiento natural para obtener unas condiciones sustancialmente estables. Se aplica a productos para los cuales la velocidad de enfriamiento desde un proceso de conformado, tal como colado o extrusión, es tal que su resistencia se incrementa por envejecimiento a temperatura ambiente.

T2: Recocido (productos colados únicamente), para suministrar ductilidad y estabilidad dimensional.

T3: tratado térmicamente a solución y entonces trabajado en frío. Aplicable a productos los cuales son trabajados en frío para aumentar la resistencia, o en los cuales el efecto de trabajado en frío en el aislamiento o enderezamiento, está tomado en cuenta en los límites de las propiedades mecánicas.

T4: Tratado térmicamente a solución y envejecido naturalmente hasta alcanzar una condición sustentablemente estable. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío.

T5: Enfriamiento desde una elevada temperatura en un proceso de conformado y sometido entonces a un envejecimiento artificial. El envejecimiento artificial aumenta las propiedades mecánicas, la estabilidad dimensional o ambas.

T6: Tratado térmicamente a solución y envejecido artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío sino que sufren un envejecimiento artificial.

T7: Tratado térmicamente a solución y entonces estabilizado.

T8: Tratado térmicamente a solución, trabajado en frío y envejecido artificialmente.

T9: Tratado térmicamente a solución, envejecido artificialmente y trabajado en frío.

T10: Enfriado desde un proceso de conformado realizado a una elevada temperatura, envejecido artificialmente hasta una condición sustancialmente estable y entonces trabajado en frío.

Existen variantes del estado T, a estas variantes se les añaden a la T dos dígitos. Estos dos dígitos son específicos para cada producto y se usan para estado de alivio de tensiones en productos fabricados mediante el proceso de forja.

3.2 HORNOS USADOS Y MEDIO DE ENFRIAMIENTO

Existen diferentes tipos de hornos para los procesos de tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio. La elección del horno debe tomarse teniendo en cuenta el tamaño y forma de la pieza, el número de piezas (tamaño del lote) y las temperaturas de tratamiento térmico del material ya que necesitamos un equipo capaz de proporcionar una precisión de temperatura de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ a $\pm 5^{\circ}\text{C}$ además de producir un calentamiento rápido y uniforme de las piezas a tratar.

Los principales hornos de tratamiento térmico para las aleaciones de aluminio pueden clasificarse de forma general en hornos de sales y hornos de aire, los hornos de sales u hornos de baño de sales, en otro tiempo de uso frecuente (sales fundidas formadas principalmente por KNO_3 y NaNO_3), a pesar de sus ventajas como el caldeo uniforme, exactitud de la temperatura $\pm 2^{\circ}\text{C}$, rápido calentamiento de las piezas y facilidad de introducir a cualquier hora pequeñas cantidades de piezas que requieran diferentes periodos de inmersión; hoy en día ha perdido popularidad ya que la operación de este tipo de hornos implica de ciertos requerimientos para su economía. El dragado es costoso y muy difícil, ya que todas las sales residuales en las partes deben de ser completamente removidas, incluyendo aquellas en las hendiduras y cavidades ya que pueden ser causa de corrosión. Además de esto son potencialmente peligrosos y para su manejo y funcionamiento se requieren ciertas precauciones especiales entre ellas:

- Los operadores deben ser personal especialmente adiestrado y deben estar protegidos contra salpicaduras y goteos de sal caliente.
- Los nitratos calientes son agentes poderosamente oxidantes, por lo que es necesario evitar todo contacto con combustibles y agentes reductores, tales como magnesio y cianuros.

- Es indispensable contar con un local bien ventilado para evitar que el personal este expuesto a los humos nitrosos producidos durante la descomposición de los nitratos.

Estas medidas protectoras se ven reflejadas en el coste de los hornos de sales haciéndolos muchas veces incosteables, sin mencionar aun su mayor riesgo, el de explosión, ya que cuando se trabaja con sales fundidas existe el riesgo de que se presenten explosiones causadas por reacciones físicas o químicas. Las primeras pueden deberse a una rápida expansión de gases atrapados debajo de la superficie del baño y las explosiones por reacción química se deben a una rápida descomposición de los nitratos debido a un sobrecalentamiento o a una reacción con el material del tanque.

Los hornos de aire son más ampliamente usados que los baños de sales, por la razón de que son de gran flexibilidad en el control de la temperatura. Cuando los programas de producción y la variedad de aleaciones a tratar requieren de frecuentes cambios en la temperatura de los tratamientos térmicos, es casi indispensable el uso de un horno de aire, ya que en estos caso el tiempo y costo para ajustar la temperatura en un horno de sales lo hace incosteable. Es mucho más caro ajustar la temperatura de un gran volumen de sales que calentar un volumen igual de aire.

Los hornos de aire alcanzan la precisión de temperaturas requerida de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ en la mayor parte del recinto del horno, necesaria para llevar a cabo los tratamientos térmicos. Los hornos de aire pueden ser del tipo con calefacción eléctrica o por combustibles (esta ha de ser indirecta, ya que los gases de combustión en la atmosfera del horno a altas temperaturas producen ampollas en el material), y son adecuados especialmente para el tratamiento de piezas con paredes delgadas o de formas complicadas. Es muy importante para conseguir un rápido calentamiento y una buena homogenización de la temperatura, contar con una buena circulación de aire. Los hornos de aire son especialmente ventajosos para tratamientos entre 100 y 200°C a partir de la cual no se aconsejan los de sales. En los hornos de aire las piezas deben de estar situadas a suficiente distancia unas de otras y sobre todo separadas de las paredes del horno.

Los hornos de aire requieren de periodos de espera cuando se cambia la temperatura de operación para permitir que las paredes del horno se estabilicen a la nueva temperatura antes de introducir las piezas. De otra manera, las piezas podrían radiar calor a las paredes frías o absorber calor por radiación de las paredes más calientes ocasionando que los instrumentos registren una temperatura que no correspondería a la temperatura real del metal.

Control de la temperatura.

Cada zona controlada de un horno, debe tener por lo menos dos termopares. Uno de los termopares debe actuar como un controlador, regulando el calor que entra al horno y el otro, debe

actuar independientemente como interruptor de seguridad, requiriendo de restablecimiento manual, si la temperatura es excedida durante el ciclo de tratamiento. En un horno de aire los instrumentos deben estar protegidos de condiciones ambientales extremas, humedad, vibración, polvo y humos corrosivos. La temperatura ambiente puede estar entre los 5°C y 49°C sin problemas, pero deben evitarse cambios de temperatura de 5°C o más por hora.

Los termopares usados en los hornos de tratamiento térmico son generalmente de hierro-constantan, chromel-alumel y a veces de platino-platinorodio, los cuales se colocan en varias posiciones dentro de los hornos. Cada instalación de medición consta del termopar, los cables compensadores y el instrumento de medida.

Los termopares se emplean como sensores de temperatura e instrumentos semejantes a los termómetros denominados pirómetros. En un pirómetro, el voltaje producido por un termopar origina que una corriente circule a través de un medidor eléctrico, el cual se calibra para indicar directamente el valor de la temperatura. Un termopar puede colocarse en un horno; cuando aumenta la temperatura en el horno, también aumenta el voltaje que se genera en el termopar. En consecuencia pasa más corriente por el medidor. En tal caso, el medidor indica el aumento de corriente como una temperatura mayor.

Puesto que la temperatura es medida en los termopares a través de la diferencia de potencial existente entre la unión fría y la caliente, es importante que la unión fría este perfectamente determinada. Por ello se usan cables de compensación, cuya misión en definitiva es trasladar la posición de la unión fría desde el punto en que se encuentre, que suele ser próximo al horno y por lo tanto difícil de mantener en un valor constante, hasta el aparato de medición utilizado, ya sean indicadores, reguladores o registradores.

Medios de enfriamiento

En el tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio se pueden emplear distintos medios de temple, su uso dependerá de la velocidad de temple requerida para la obtención de las propiedades deseadas para una determinada pieza.

Las velocidades de temple de los distintos medios templantes usados más comúnmente se dan a continuación en la tabla 1. En esta tabla el aire se incluye únicamente con fines comparativos.

Tabla 1. Velocidades de temple en distintos medios templantes.

Medio templante	Velocidad de temple (°C/seg)
Agua a 20°C	2500
Aceite ligero	689
Aceite medio	153
Aceite pesado	71
Agua a 100°C	23
Aire agitado	7.7
Aire en calma	2.2

La velocidad de temple está regida por tres factores fundamentales:

1. Características de la aleación: se puede decir que la sensibilidad de las aleaciones a la velocidad de temple es muy diferente, por lo que no se recomienda correlacionar resultados de un tipo de aleación con otro tipo diferente.
2. Forma y dimensiones de la pieza: la forma y dimensiones de la pieza pueden variar arbitrariamente, por lo que la velocidad de enfriamiento será en función de la relación área-volumen, debido a que la transferencia de calor durante el temple estará limitada por la resistencia de la superficie en contacto con el medio templante.
3. Medio templante: el medio que permite mayores velocidades de temple es el agua, siendo más o menos rápido el enfriamiento según sea la temperatura del agua. Al introducir las piezas en el agua de temple, se forma una película de vapor de agua entorno a la pieza, la cual puede actuar como un factor retardante del temple, por lo que también se puede aumentar la velocidad de temple añadiendo al agua sustancias que retengan la capa de vapor en torno a la pieza. También se consiguen retardos, añadiendo al agua productos que den depósitos sólidos sobre el metal. Es recomendable emplear siempre, velocidades de temple superiores a las mínimas aconsejables para poder obtener las características mecánicas y la resistencia a la corrosión deseadas.

3.3 EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO EN LAS PROPIEDADES Y LA ESTRUCTURA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

El tratamiento térmico mejora las propiedades mecánicas de varias aleaciones de aluminio moldeadas y forjadas, los principales constituyentes que hacen a la aleación susceptible de tratamiento térmico son cobre, magnesio y silicio y son sustancias que tienen una marcada solubilidad en el aluminio, mayor a elevadas temperaturas que a temperatura ambiente.

Otros elementos tales como hierro y calcio, si están presentes en cantidades demasiado grandes, interfieren y pueden impedir completamente el efecto beneficioso del tratamiento térmico y si se les aplica un tratamiento térmico es solo para eliminar tensiones internas. El tratamiento térmico es simplemente un medio de distribución más eficaz de los ingredientes de la aleación, de tal modo que puedan estos realizar con más efectividad su función del endurecimiento del metal.

El tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio está basado en un calentamiento y enfriamiento controlados de las piezas, sin llegar a la fusión y manteniendo el estado sólido, afectando solamente la estructura cristalina del metal, con cambios en el tamaño, la forma y la localización de los microconstituyentes de la estructura.

Los cambios de propiedades que ocurren en el tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio son causados por la solución y precipitación de fases endurecedoras, las cuales están regidas por su solubilidad sólida

Cuando solidifican las aleaciones de aluminio, los elementos de aleación e incluso las impurezas tienen otros esquemas de red atómica. Si un segundo metal es soluble en el aluminio, unos cuantos átomos del segundo metal sustituyen los átomos de aluminio en algunos lugares de su red atómica, como se muestra en la figura 7.

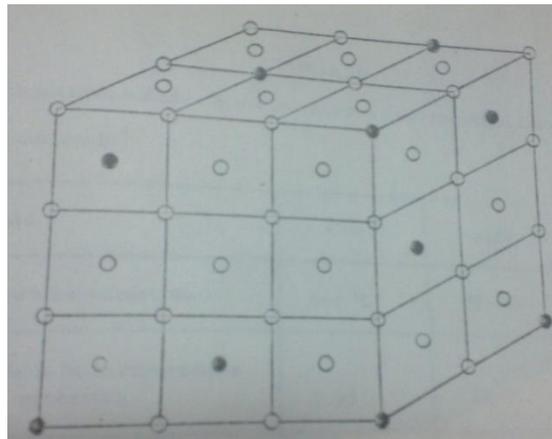


Figura 7. Los puntos negros representan átomos del metal disuelto según podrían aparecer cuando otro elemento es aleado con aluminio.

La sustitución cambia ligeramente las dimensiones de la red, pero no cambia el esquema geométrico fundamental. A la absorción del segundo elemento por sustitución en la red atómica del aluminio se le llama disolución sólida.

Estos átomos de metal disuelto pueden difundirse por toda la red atómica y precipitarse de la solución, generalmente como un compuesto intermetálico a medida que disminuye la temperatura o viceversa, pueden volver a la solución sólida a medida que la temperatura aumenta. La relación de estos cambios, así como la solubilidad total, varían ampliamente con la temperatura y la realización de los resultados que se logran mediante el tratamiento térmico con un control preciso de la temperatura, el tiempo y las relaciones de enfriamiento. Las solubilidades sólidas de los elementos que usualmente se agregan a las aleaciones de aluminio para hacerlas capaces de responder al tratamiento térmico y que son el cobre, el magnesio y una combinación de magnesio y silicio, formando el silicuro de magnesio, que tiene el efecto de un solo elemento, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Solubilidad sólida de los elementos endurecedores en las aleaciones de aluminio.

Elemento	Cobre	Magnesio	Silicuro de magnesio
Temperatura eutéctica	548°C	450°C	595°C
% soluble a la temperatura eutéctica	5.65	14.9	1.85
% soluble a:			
538°C	5.35	-----	1.27
510°C	4.48	-----	1.08
482°C	3.58	-----	0.92
427°C	2.03	13.2	0.64
371°C	1.08	9.9	0.45
316°C	0.55	7.1	0.32
260°C	0.35	4.7	0.27
204°C	0.24	3.1	0.25
149°C	0.20	2.1	0.24

La resistencia de una aleación y el tratamiento térmico para mejorar esta propiedad, se explican considerando el mecanismo interno de la deformación, la cual ocurre a lo largo de los planos en la estructura del núcleo unitario, llamados planos de deslizamiento (fig. 8). Estos planos se ubican de tal manera que el número más grande de átomos ocurre en ese plano. Así mismo, la deformación de los granos cristalinos ocurre a lo largo de los planos de deslizamiento (fig. 9).

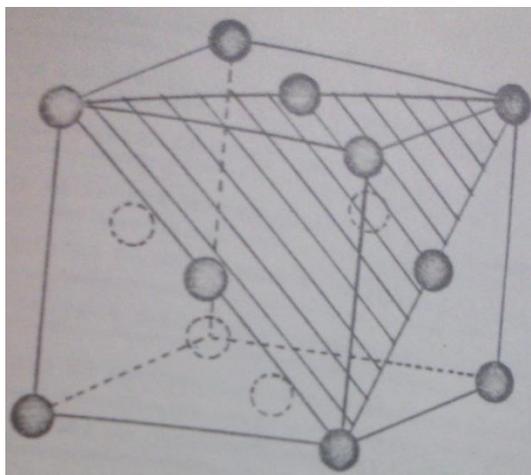


Figura 8. Planos de deslizamiento en un núcleo de aluminio.

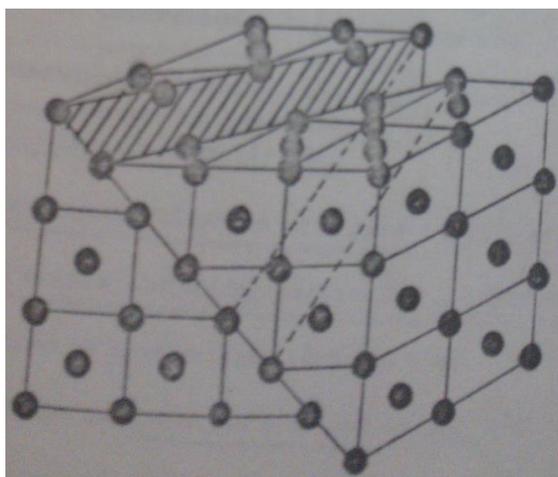


Figura 9. La deformación de grano de aluminio ocurre a lo largo de planos diagonales.

La ductilidad del aluminio depende de su capacidad para deslizarse a lo largo de los planos, y la resistencia depende de la fuerza que se opone a este deslizamiento, de modo que si se desea incrementar la resistencia del aluminio se deberá incrementar la fuerza que se opone al movimiento relativo a lo largo de sus planos de deslizamiento. El incremento de la resistencia se logra mediante el tratamiento térmico haciendo que se depositen partículas de compuestos intercristalinos relativamente grandes a lo largo de los planos de deslizamiento, las cuales dificultarán el movimiento relativo de las capas de la red atómica. Esto se logra produciendo primero, por calentamiento, una solución sólida sobresaturada de los elementos de aleación y manteniéndolos en solución sólida mediante un enfriamiento rápido. Después, calentando a bajas temperaturas se provoca la precipitación de los constituyentes de la estructura en forma de partículas con tamaño y distribución controlados, lográndose de este modo un efecto de robustecimiento máximo del aluminio aleado.

3.4 PASOS A SEGUIR EN EL TRATAMIENTO TERMICO.

Un tratamiento térmico para aleaciones de aluminio consiste usualmente de tres etapas: solución, temple y precipitación o envejecimiento; pero en ocasiones el tratamiento térmico puede consistir de una sola etapa, como en el caso de un recocido o de una precipitación. A continuación se describirán cada una de estas etapas.

TRATAMIENTO TERMICO DE SOLUCIÓN.

El tratamiento de solución consiste en calentar el material a una temperatura próxima a la de fusión del eutéctico con objeto de lograr una solución sólida sobresaturada lo más homogénea posible. Debe tenerse cuidado de no exceder la temperatura de inicio de fusión del eutéctico, por lo que este límite inferior deberá estar siempre por encima de la temperatura a la cual se hace la solución. Si se llega a exceder la temperatura de fusión del eutéctico ocurre una fusión de los bordes de grano y el material se torna frágil y quebradizo y es irrecuperable, por lo que es necesario volverlo a fundir. Esta peligrosa condición normalmente no se puede detectar por inspección visual, ni por pruebas no destructivas. A este fenómeno de fusión del eutéctico se le conoce como quemado, y a veces es el origen de los agrietamientos que aparecen al templar.

Entre más alta es la temperatura de solución, mayor es la cantidad de soluto que admite el solvente en solución sólida y mayor es la resistencia mecánica y límite de elasticidad que se pueden alcanzar posteriormente en los tratamientos de precipitación o envejecimiento.

El tiempo de solución no depende de la temperatura de solución, sino que está en función del tipo de producto, aleación y del proceso de fabricación utilizado, es decir, de las condiciones en que se encuentra el material antes del tratamiento.

La heterogeneidad estructural de las piezas moldeadas, hace que se requieran tiempos largos de permanencia.

La velocidad de calentamiento debe ser la mayor posible, para evitar crecimientos excesivos de grano por calentamientos lentos.

En el tratamiento de solución, mayor tiempo no es equivalente a menor temperatura, como ocurre en otros tratamientos. Los tiempos de tratamiento de solución no se pueden dar con la misma precisión que las temperaturas. Son función de la composición (hay constituyentes que tardan más en disolverse que otros), de la deformación plástica previa que haya sufrido el material, y de las dimensiones (los productos de espesor pequeño requieren de tiempos de tratamiento de solución más cortos que los espesores gruesos).

TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE.

Para evitar el tipo de precipitación perjudicial para las propiedades mecánicas o resistencia a la corrosión, la solución sólida formada durante el tratamiento de solución debe ser enfriada rápidamente para producir una solución supersaturada a temperatura ambiente, que es la condición óptima para la posterior precipitación y endurecimiento, esto es, conservar tanto como sea posible la solución sólida formada a la temperatura de solución. Esto se logra normalmente por inmersión de las piezas en agua fría. Este tratamiento es, en muchos aspectos, el paso más crítico en la secuencia de operaciones del tratamiento térmico.

El enfriamiento rápido es conveniente para algunas características, pero se debe tener en cuenta que para determinadas secciones o formas un enfriamiento muy brusco puede introducir demasiadas tensiones e incluso romper el material.

Es importante evitar que ocurra alguna precipitación apreciable durante el enfriamiento, para esto, es necesario que el tiempo de transferencia del horno al medio templante, sea lo suficientemente corto para eliminar un posible preenfriamiento lento en el rango de temperatura donde ocurre una precipitación muy rápida, y que el volumen del medio de temple sea capaz de absorber el calor y pasar un flujo tal que evite en las piezas la precipitación durante el enfriamiento a través del rango de 400 a 260°C.

El tiempo de transferencia de la pieza del horno al medio de temple es conocido también como tiempo de retardo, debido a que aun cuando dicho tiempo sea muy corto da lugar a un cierto retraso en la inmersión en el medio templante y esto, es de especial importancia sobre todo cuando se trata de piezas de sección delgada.

El tamaño de las piezas o la sección obliga a tener en cuenta ciertas consideraciones, por ejemplo, si se trata de secciones muy gruesas, no se puede pretender que se obtengan las propiedades en toda la sección, aunque de cualquier forma, la disminución del valor de la resistencia mecánica no debe ser demasiado significativa.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENVEJECIMIENTO.

Cuando una aleación acaba de ser templada, se inicia la precipitación del compuesto Al-Cu, Al-Mg o Al-Si. El procedimiento es lento a la temperatura ambiente y el desarrollo completo de las propiedades del tratamiento térmico exige muchos días, a este proceso se le ha aplicado el término de envejecimiento. Cuando este proceso tiene lugar a la temperatura ambiente, se le designa como envejecimiento natural o precipitación natural. El símbolo T4 que se emplea después del número de la aleación indica que esta ha sido tratada térmicamente en solución,

templada y dejada envejecer naturalmente a la temperatura ambiente hasta que las propiedades mecánicas han llegado a ser sustancialmente estables.

El endurecimiento por precipitación puede acelerarse notablemente elevando la temperatura, esto se designa como envejecimiento artificial. Este tratamiento consiste en la selección de un ciclo tiempo-temperatura adecuado para obtener las propiedades finales deseadas. Para la selección de este ciclo se deben tener ciertas consideraciones con el fin de producir el tamaño óptimo de precipitado, con una distribución homogénea. Desafortunadamente el ciclo para obtener los valores máximos en una propiedad, tal como la resistencia a la tracción, es comúnmente diferente del requerido para obtener los valores máximos en otras propiedades, tales como la elongación o resistencia a la corrosión por ejemplo, por lo que, normalmente en un tratamiento se busca un ciclo el cual proporcione mejor combinación de propiedades.

El envejecimiento natural no solo se diferencia del envejecimiento artificial en el intervalo de temperaturas a que tiene lugar el tratamiento, los cambios estructurales que se producen a alta temperatura son diferentes a los que ocurren a temperatura ambiente. Estas diferencias se acusan en las características mecánicas y algunas propiedades físicas. Para cada temperatura, hay que buscar un equilibrio entre una duración suficientemente larga, para que no haya problemas de rebasar el tiempo y a la vez suficientemente corto para que resulte económico el tratamiento.

Los tratamientos por precipitación que más comúnmente se emplean están normalizados para aproximarse a una resistencia casi máxima mientras que todavía se tiene un alargamiento suficiente para evitar fragilidad.

Modificando los tiempos y las temperaturas en el envejecimiento se puede llegar a valores diferentes, según se use como criterio, la resistencia a la tracción o el límite elástico; cuando las características mecánicas no son tan importantes, y si lo es la resistencia a la corrosión bajo tensión o la estabilidad dimensional, se acude a los tratamientos de sobre-envejecimiento o superenvejecimiento.

Las temperaturas de tratamiento de envejecimiento artificial deben mantenerse perfectamente reguladas dentro de una variación máxima de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.5 DEFECTOS Y FALLAS DE UN TRATAMIENTO TERMICO.

Un tratamiento térmico incorrecto puede dar lugar a defectos que pueden ser visibles a simple vista o visibles solamente mediante un análisis metalográfico. En ocasiones, piezas que parecen haber sido tratadas en las mejores condiciones presentan estos defectos, por lo que es necesario entonces, buscar la causa en los tratamientos de conformación, colada o incluso de fabricación de la aleación.

Un tratamiento térmico también se considera defectuoso cuando las propiedades mecánicas o químicas finales no son las que se pretendían obtener con dicho tratamiento.

Cuando se tienen dudas sobre las causas de alguna falla en el tratamiento térmico, una precaución inmediata conveniente, es comprobar que la aleación tiene la composición que se pensaba y que el tratamiento dado es realmente el que corresponde a esta aleación.

CAPITULO 4

TRABAJO EXPERIMENTAL.

A continuación se hace una descripción de la metodología empleada para la realización de esta tesis. Se expone el criterio seguido para la selección de reactivos y materia prima, los métodos y técnicas empleadas en la fusión y moldeo, en las operaciones de tratamiento térmico, así como una descripción del maquinado y de las pruebas realizadas a cada una de las probetas obtenidas.

4.1 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

La selección de materia prima consistió en la selección de un lingote de aleación de aluminio 356 de segunda fusión verificando que la composición química de este lingote se encontrara dentro de los límites marcados por la especificación ASTM SG70A para lingotes, a la cual corresponde la aleación de aluminio 356 comercial esta es una aleación aluminio-silicio hipoeutectica. La composición química del lingote fue la siguiente:

Tabla 3. Composición química del lingote.

	%Si	%Mg	%Fe	%Cu
	6.914	0.329	0.354	0.005
ASTM SG70A	6.5-7.5	0.25-0.40	0.50 máx.	0.25 máx.

El lingote al ser de una gran dimensión se tuvo que cortar en pequeñas secciones para facilitar la etapa de fusión, el proceso se inició con una sierra de banda eléctrica pero debido a que el corte era continuo y el material a cortar era muy tenaz la sierra se atascaba y la banda se rompió, por lo que se tomó la decisión de cortarla por medio de una sierra de vaivén o alternativa la cual al dar un espacio entre cada corte evitaba el atascamiento de la segueta haciendo los cortes de una manera más eficaz obteniendo un mejor resultado.



Figura 10. Corte con sierra de banda eléctrica.



Figura 11. Corte con sierra de vaivén o alternativa.



Figura 12. Lingote cortado en secciones.

4.2 FUSIÓN Y MOLDEO.

La fusión del lingote de aluminio se realizó en un crisol de grafito con capacidad de 0.500 kg de aluminio, debido dicha capacidad es que se tomó la decisión de seccionar el lingote ya que al introducir trozos grandes al crisol al momento de empezar a elevarse la temperatura con la dilatación que presenta el metal se corría el riesgo de que el crisol se rompiera al no aguantar tal expansión por eso se cortó el lingote en secciones que pudieran introducirse con facilidad en el crisol. La fusión se llevó a cabo en un horno eléctrico de laboratorio tipo mufla. No se llevó ningún control de atmosfera en la mufla durante la fusión, ni se efectuó ningún procedimiento de desgasificado. La temperatura se controló mediante un termopar de Cromel-Alumel conectado a un indicador digital.



Figura 13. Equipo utilizado en el proceso de fundición.

Las herramientas que fueron utilizadas durante el proceso de fundición fueron recubiertas con pintura de grafito la cual tuvo la función de aislante, es decir, que el material caliente no se soldara o se pegara en ninguno de los instrumentos con los que tuviera contacto los instrumentos recubiertos fueron los siguientes: en primer lugar el crisol, este se recubrió con la finalidad de que la aleación a fundir no se pegara en sus paredes, lo cual dificultaría su limpieza y podría provocar que el crisol no funcionara para futuras fundiciones.



Figura 14. Aplicación de la pintura de grafito al crisol.

Después se recubrieron las tenazas para el crisol, esto para que no se pegaran al crisol debido a la alta temperatura con la que se saca del horno y si las tenazas no llevaran esa capa de recubrimiento se pegarían al crisol ya que son de metal.



Figura 15. Herramental utilizado para el proceso de extracción y vaciado del crisol.

Por último se recubrió el molde, el molde utilizado fue un molde permanente de acero, este molde llevo un proceso de preparación el cual consistió en lijar la superficie del molde para alisarla y a continuación se procedió a aplicar la pintura a base de grafito en suspensión esto para evitar la adherencia del material al molde y facilitar el desmolde, dicha capa de pintura al secar tenía una terminación áspera y porosa, para eliminar esta terminación indeseada se lijo la capa de aislante con una lija de grano muy fino esto para evitar quitar todo el material de la capa aislante y garantizar un acabado suave en la superficie esto con la finalidad de que al momento de vaciar en material fundido en el molde y este solidificar obtener un acabado aceptable en la pieza es decir sin muchos poros o marcas.



Figura 16. Proceso de preparación del molde.

Como ultimo paso previo al inicio de la fundición se precalentaron en un horno electrico a una temperatura de 70°C todos los instrumentos herramentales que iban a estar en contacto con el metal liquido para eliminar cualquier rastro de humedad en su superficie o en los poros de esta ya que si alguna de estas piezas estuviera humeda al entrar en contacto con el metal liquido la humedad provocaria que el metal saltara y salpicara provocando un accidente, ademas de contaminar al aluminio liquido.



Figura 17. Horno electrico utilizado para el proceso de precalentado de las herramientas y el molde.

Para el proceso de fundición se coloco el crisol dentro del horno electrico y se le suministro una carga de trozos de lingote para proceder a su fundición, la colocacion de los trozos se hizo tomando en consideración que no quedaran muy justos dentro del crisol esto para evitar fisurar el crisol al momento de la dilatación del metal. La temperatura de trabajo del horno electrico se fijo en $680^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.



Figura 18. En la figura de la izquierda se muestra el crisol con la carga del material a fundir en la mufla. En la figura de la derecha se observa la temperatura de trabajo.

Una vez que la carga de material depositada en el crisol se encontraba fundida se procedio a vaciar el material liquido dentro del molde. Para iniciar el vaciado se comenzaba extrayendo el crisol del horno electrico por medio de unas tenazas que permitian el agarre dentro del horno y el transporte del crisol hasta el area donde se encontraba el molde ya precalentado y debidamente aprisionado por unas prensas las cuales unirian las dos partes del molde es decir sellando las uniones evitando derrames.



Figura 19. Proceso de extracción del crisol con material fundido.

Una vez que el crisol se encontraba en el area de vaciado se cambiaban las tenazas por unas que nos permitieran inclinar el crisol, una vez colocadas las nuevas tenazas se extraia la escoria por medio de una pieza de metal larga y gruesa hasta una lingotera para evitar derrames, y final mente se iniciaba el vaciado del material, este vaciado se realizo de forma continua, es decir una vez que se comenzaba a vaciar el material en el molde no se detenia el vaciado hasta llenar el molde.



Figura 20. Proceso de vaciado del material fundido en el molde.

Al terminar el vaciado se cambiaban de nuevo las tenazas por las que mantenian el crisol vertical y este regresaba al horno esto para evitar que el material sobrante dentro de él solidificara, es importante mencionar que este proceso de vaciado se hizo en el menor tiempo posible. Una vez lleno el molde, el metal liquido solidificaba en cuestion de segundos pero se dejaban pasar unos minutos antes retirar las prensas y abrir el molde esto para dejar que el molde se enfriara un poco ya que debido al intercambio de calor que existia al entrar en contacto el metal a muy alta temperatura con el molde a una temperatura relativamente mucho mas baja era demasiado ya que el molde alcanzaba temperaturas mayores de 250°C haciendo esta temperatura riesgosa la accion de abrir o manipular el molde. Una vez que la temperatura del molde disminuia y se volvia manejable se retiraban las prensas y se abria el molde.



Figura 21. En la figura se observa la probeta solidificada en el molde.

Una vez abierto el molde se extraia la probeta y se dejaba enfriar. Estos procesos de fundición y moldeo se repitieron hasta completar un lote de 20 probetas.



Figura 22. Probeta extraida del molde.

Ya obtenidas las 20 probetas se dio lugar al retiro de excesos, es decir, el corte de aquellas partes que están de más y no tienen función en los próximos procesos y que cuya función únicamente fue la alimentación y alivio del molde y de ahí su creación, para el retiro de estos excesos se utilizó una sierra de vaivén o alternativa la elección de esta es por su efectividad para el corte de esta aleación y es el mismo motivo por el que se usó en el proceso de corte del lingote, primero se retiró la parte de la alimentación y posteriormente las partes de alivio. Una vez que los cortes fueron finalizados se procedió a su almacenamiento en refrigeración para evitar alguna modificación en su estructura y así continuar con el tratamiento térmico de las probetas.



Figura 23. Corte de sección de alimentación.



Figura 24. Corte de secciones de alivio.

4.3 TRATAMIENTO TÉRMICO.

Una vez obtenidas las probetas y eliminados los excesos de fundición de ellas se dio lugar a los diferentes tratamientos térmicos. Un par de probetas fueron destinadas para la determinación

de sus características estructurales, físicas y mecánicas en verde (se le llama en verde a las piezas obtenidas por fundición, con la estructura y propiedades obtenidas en la vaciada o colada, sin llevar ningún tipo de tratamiento térmico o de deformación) y 16 probetas fueron sometidas a los siguientes tratamientos térmicos:

El primer tratamiento térmico aplicado consistió en llevar todas las probetas a solución durante un periodo de 6 horas (tiempo de solución) a una temperatura de $538^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ (temperatura de solución), este tratamiento térmico de solución fue realizado en un par de hornos eléctricos, se utilizaron dos hornos debido al gran tamaño del lote, una vez concluido este ciclo de solución, las probetas fueron templadas en agua contenida en un recipiente metálico a temperatura ambiente 24°C (enfriamiento rápido), el tiempo de transferencia o tiempo de retardo de las probetas desde el horno hasta su introducción al recipiente con agua fue de 3 segundos permaneciendo en el tanque durante 5 minutos (tiempo de inmersión). Una vez concluido el templado el lote de probetas se almacenó nuevamente en refrigeración para evitar alguna modificación de su estructura, mientras se sometían al tratamiento de envejecimiento.



Figura 25. Tratamiento térmico de solución a 538°C de las probetas en hornos eléctricos.

Una vez que las probetas fueron sometidas al tratamiento de solución y templado se procedió con el tratamiento térmico de envejecimiento natural de la siguiente manera:

- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento natural 0 horas.
- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento natural durante 12 horas.
- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento natural durante 20 horas.

Este tratamiento consistió en dejar las probetas a temperatura ambiente por el tiempo que se estableció y una vez cumplido el tiempo se almacenaron en refrigeración para evitar que sufrieran modificaciones en su estructura hasta que los tres pares de probetas completaran el tratamiento térmico de envejecimiento natural una vez que esto se cumplió las 6 probetas se sometieron a un tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 6 horas a una temperatura de 185°C, completando para estas su ciclo de tratamientos térmicos.

El resto de las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento o precipitación artificial en hornos eléctricos de la siguiente manera:

- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 6 horas a una temperatura de 155°C.
- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 6 horas a una temperatura de 170°C.
- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 6 horas a una temperatura de 185°C.
- 2 probetas fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento artificial durante 6 horas a una temperatura de 236 °C.

4.4 MAQUINADO.

Ya finalizados los tratamientos térmicos se dio paso al proceso de maquinado, esto con la finalidad de rectificar cada una de las probetas y conseguir una mejor superficie de trabajo y un mejor acabado de las mismas y así obtener mejores resultados. El proceso de maquinado se llevó a cabo en un torno, se decidió someter las probetas al maquinado debido a que la superficie se encontraba porosa y era necesario quitar el exceso de material que no se pudo eliminar con el corte de excesos de fundición y esto daba lugar a que la superficie en la cual se sujetarían las mordazas a la hora de someter las probetas a los ensayos de dureza y tensión fuese irregular provocando variaciones en las mediciones de tensión al haber deslizamiento de mordazas o algún acomodo de estas durante la prueba, o al llevar a cabo el ensayo de dureza el indentador podría haber hecho la medición en un lugar irregular en vez de la superficie plana que se requiere para llevar a cabo esta prueba y por lo tanto obtener mediciones erróneas. Por lo tanto con el maquinado aseguramos un mejor resultado al llevar a cabo las pruebas mecánicas.



Figura 26. Probeta sin maquinar.



Figura 27. proceso de maquinado de probeta.

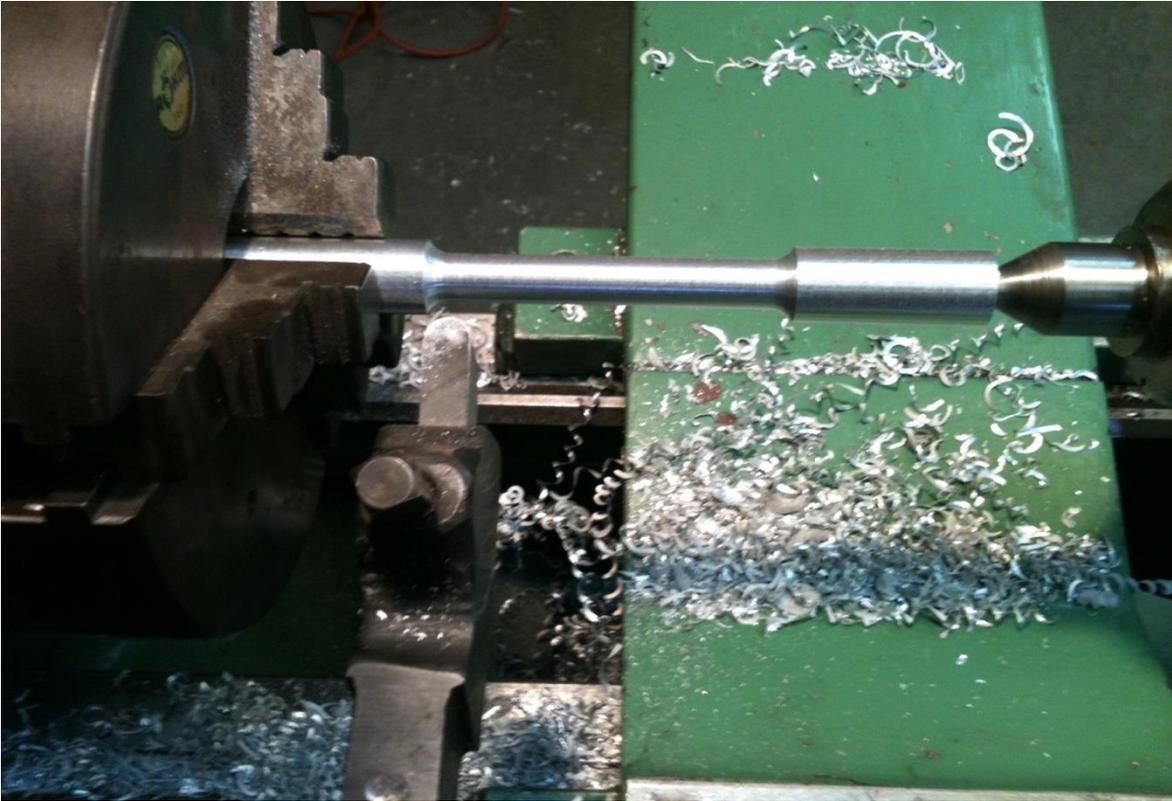


Figura 28. Probeta maquinada.



Figura 29. Lote de probetas maquinadas.

El diametro de las probetas tuvo una variación la cual estuvo en función de la profundidad de la porosidad que estas tenían en su superficie por eso se observan diferentes diametros en cada una de las probetas. Una vez maquinadas las probetas se marcaron por medio de un vibrador con la información del tratamiento termico, temperatura y tiempo del tratamiento termico esta información se grabo en los dos extremos de la probeta para que al momento de someterlas al ensayo de tensión cada mitad de la probeta estuviera identificada esto con la finalidad de tener un control del lote y evitar confusiones.



Figura 30. Proceso de marcado para identificación de probetas.



Figura 31. Probetas sometidas a tratamiento termico de envejecimiento artificial a 155°C marcadas.

4.5 ENSAYO DE PROBETAS.

Las pruebas realizadas en este estudio a cada probeta obtenida fueron las siguientes:

Prueba de tensión.

Prueba de dureza.

Análisis Metalográfico.

Dichas pruebas fueron hechas bajo las mismas condiciones de prueba para cada una de las probetas. A continuación se describe cada una de estas pruebas.

4.5.1 PRUEBA DE TENSIÓN.

La prueba de tensión de las probetas se llevó a cabo mediante una maquina universal Instron, para montar las probetas en el equipo con la misma profundidad de las mordazas para esto se marcaron limites en los extremos de las probetas en los cuales debía de quedar el extremo de la mordaza esto con la finalidad de que la mordaza sujetara la misma cantidad de la probeta en cada extremo y obtener un mejor resultado.



Figura 32. Equipo utilizado para las pruebas de tensión de las probetas.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente, empleando una velocidad de prueba de 5 mm de deformación por minuto.

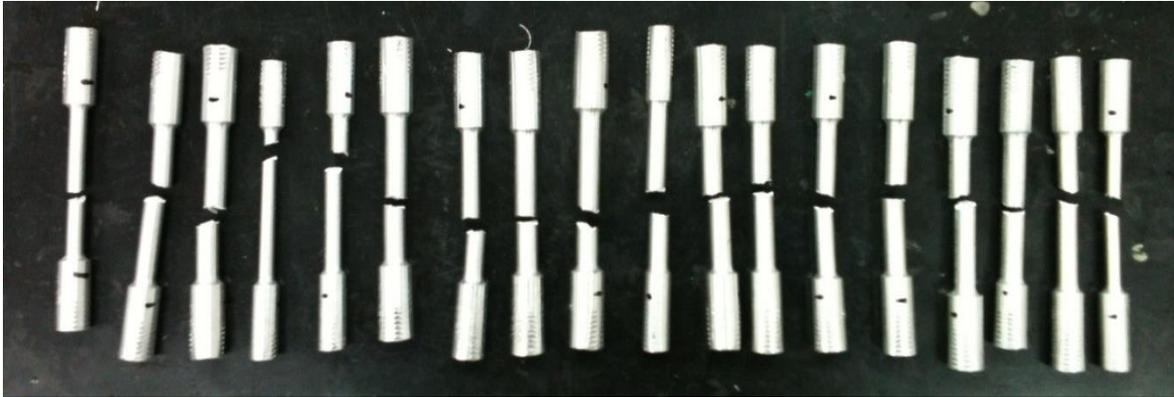


Figura 33. Probetas despues de ser sometidas a la prueba de tensión.

4.5.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.

Para llevar acaba los ensayos de dureza en las probetas se corto un trozo en forma de cilindro del extremo fracturado de una de cada par de las probetas ya ensayadas bajo tensión esto con la finalidad de ver la forma que tenia la zona de fractura, una vez obtenidas las muestras de cada probeta se introdujeron en unos moldes de PVC de forma cilindrica con la zona de fractura de la muestra viendo hacia las paredes del molde una vez colocadas las muestras de forma correcta en cada molde se procedio a rellenar cada cilindro con resina, una vez que la resina se endurecio se desmoldaron las muestras y se marco cada uno de los cilindros para evitar confusiones.



Figura 34. Proceso de montaje de las muestras en resina.

Este montaje fue necesario para hacer mas manejables las muestras durante los siguientes ensayos y por que para dichos ensayos se necesitaba una superficie de contacto plana asi como la base de la muestra y al ser de un tamaño pequeño y de forma cilindrica se volvan dificiles estas tareas, ya obtenidas las muestras se procedio a desvastar la mitad de la muestra en el torno, esto con la finalidad de obtener una superficie plana para llevar a cabo el ensayo de dureza asi como para la preparacion para el análisis metalográfico, es decir procedimos a cortar la muestra cilindrica a la mitad, y a su vez se rectifico la base hecha de resina para que quedara plana.



Figura 35. Proceso de desvaste de las probetas montadas en resina.

Ya rebajadas las muestras, en una pulidora con lija de grano fino y agua se comenzo el pulido se comenzo con una lija fina y se continuo con lija de un grado mas fino cada vez para eliminar rayaduras y empezar a obtener un pulido cada vez mas fino. Una vez que el ciclo de lijado se finalizo se cambio del disco la lija y se continuo el pulido con un paño para pulir al cual se le agregaba alumina de 0.3μ mezclada con agua según fuera exigiendo la muestra hasta obtener un acabado espejo y poder proceder con el ensayo de dureza y el analisis metalografico de la muestra.



Figura 36. Equipo utilizado para el proceso de pulido de las muestras.

Inmediatamente despues de obtener el acabado espejo en la superficie de la muestra se enjuago con agua para quitar los residuos que pudieran quedar de alumina y se le aplico posteriormente etanol ya que gracias a que evapora mucho mas rapido que el agua nos ayudo a eliminar cualquier residuo de humedad en la muestra, ya aplicado el etanol se acelero el secado con una pistola de aire caliente.



Figura 37. Limpieza de las muestras con agua y etanol.

Después de aplicar y secar el etanol se procedió con el ataque este fue por medio de ácido fluorídrico al 2%, para este proceso se vació una pequeña cantidad de HF 2% en un recipiente de plástico y se sumergían las muestras dentro del ácido y se mantenían en contacto durante 10 segundos aproximadamente, tiempo suficiente para que el ácido provocase el ataque y dejara expuesta la estructura metalográfica. Se tuvo cuidado de no exceder el tiempo de inmersión de la muestra en el ácido para evitar un sobre ataque, situación que hubiera provocado que no se pudiera examinar la muestra y por lo tanto se tuviera que comenzar con el proceso de preparación de nuevo. Una vez que el tiempo de ataque finalizaba se enjuagaba la muestra con agua para eliminar los residuos del ácido y nuevamente se le aplicaba etanol para acelerar el secado y este se secaba con pistola de aire para eficientar el secado de la misma y asegurarnos de eliminar todo rastro de humedad, ya que si no se tenía cuidado de eliminar la humedad se corría el riesgo de que la muestra quedara con manchas en la superficie a examinar.



Figura 38. Ataque de las muestras.

4.5.3 PRUEBA DE DUREZA.

Para la prueba de dureza se concluyó que el acabado de la muestra debía ser un acabado espejo para garantizar que el indentador tuviera contacto con una superficie plana y evitar errores de medición al hacer este contacto con alguna rayadura o superficie irregular.

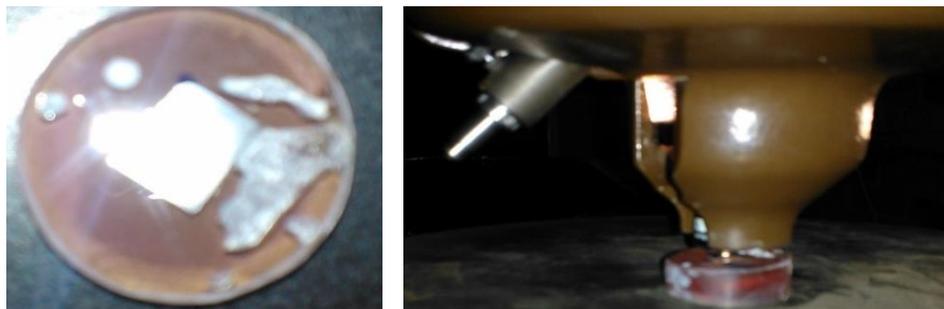


Figura 39. Muestra colocada para proceder con la prueba de dureza.

La determinación de la dureza (resistencia a la penetración) en las probetas fue hecha mediante un durometro que tenía la capacidad de realizar ensayos ya fueran en escala Vickers, Rockwell B o C y Brinell, para este estudio se eligió la escala Vickers, por lo tanto el indentador o penetrador empleado fue en forma de pirámide y la carga seleccionada fue de 2 Kg.



Figura 40. Equipo utilizado para las pruebas de dureza.

Esta prueba se llevó a cabo de la siguiente manera, se colocaba la muestra en la base del durómetro teniendo precaución en dejar un espacio mínimo entre el indentador y la muestra este espacio se regulaba por medio de la base ya que esta contaba con una cuerda la cual al girar un disco en la parte inferior permitía que la base subiera o bajara según fuera la necesidad, una vez colocada la muestra se aplicaba la carga por medio de una palanca ubicada en un costado del durometro, la aplicación de la carga al activar la palanca era automática así que ya que finalizaba el movimiento de la palanca se retiraba el indentador y se colocaba una mirilla la cual dejaba pasar un rayo de luz el cual reflejaba la imagen de la prueba en una pantalla de acrílico ubicada en la parte superior del durometro una vez calibrada la imagen se procedía a medir las diagonales de la imagen reflejada por medio de una regla integrada en el marco de la pantalla, ya obtenidas las mediciones de las diagonales se calculó la dureza.

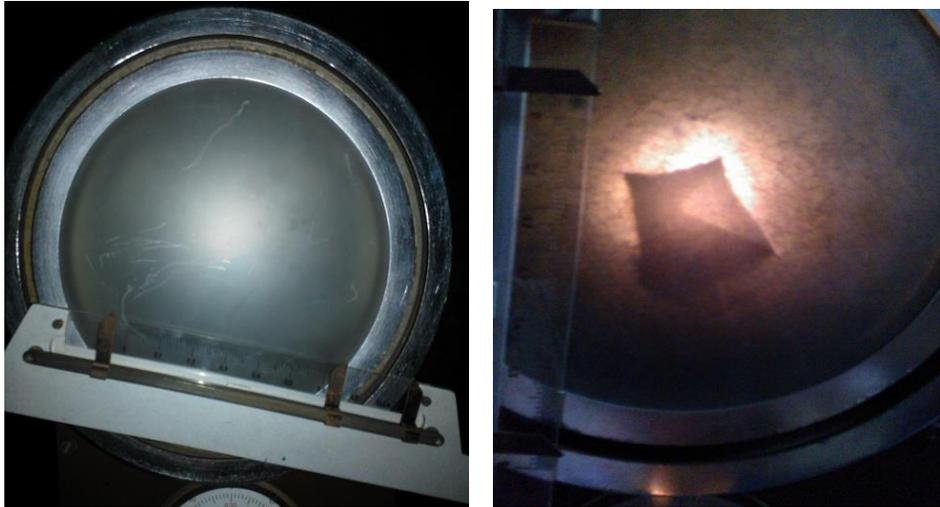


Figura 41. En las imágenes se muestra la pantalla de acrílico utilizada para la medición de las diagonales así como la marca dejada por el indentador durante la prueba.

4.5.4 ANÁLISIS METALGRÁFICO.

La determinación del tipo de estructura de solidificación y del tipo de estructura obtenido después del tratamiento térmico se hizo por medio de un microscopio metalúrgico de platina invertida, con poder de resolución de 800 aumentos y con una cámara integrada por medio de un sistema de acoplamiento especial. Para este análisis se observaron las estructuras metalográficas así como la superficie de fractura a 100X y 400X para tener un mejor rango de análisis.

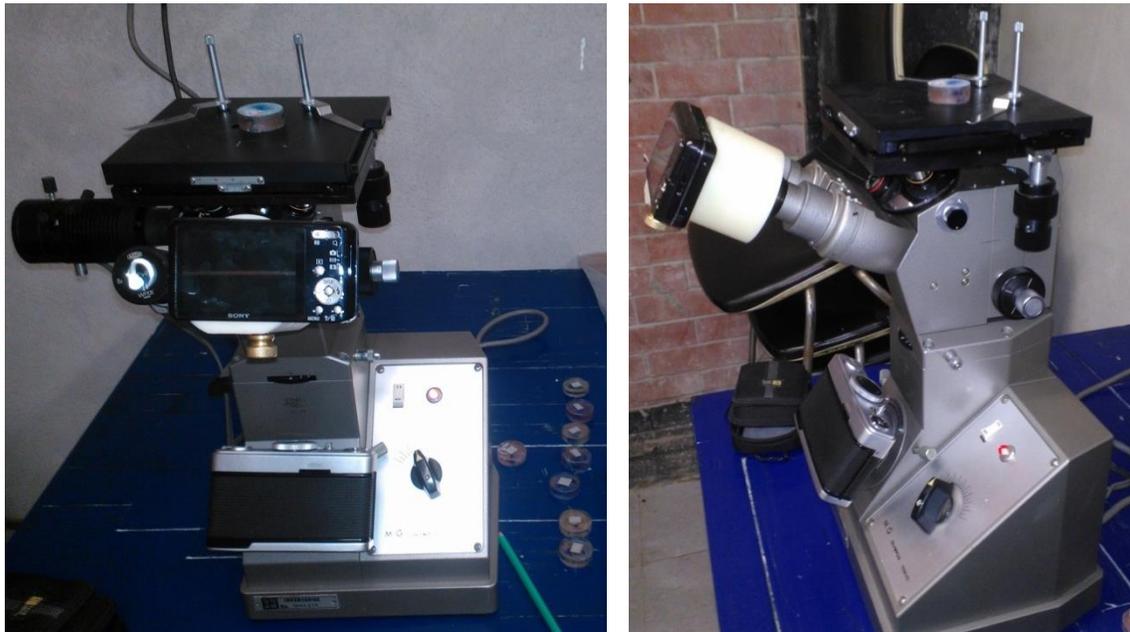


Figura 42. Equipo utilizado para la toma de fotomicrografías durante el análisis metalográfico.

CAPITULO 5

RESULTADOS.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos en las pruebas del desarrollo experimental y el tratamiento térmico presentando una serie de fotomicrografías tomadas a 100 aumentos (100 X) y 400 aumentos (400 X) de las estructuras tratadas térmicamente, así como los resultados de las pruebas realizadas a las probetas obtenidas en este estudio para la determinación de sus propiedades mecánicas y físicas.

5.1 ESTRUCTURAS METALOGRAFICAS.

Todos los ensayos realizados para conocer los efectos del tratamiento térmico en cada una de las coladas obtenidas, han sido comprobados desde dos aspectos diferentes: el primero ha sido la observación de las estructuras metalográficas y el segundo, la determinación de propiedades físicas y mecánicas, tales como, la resistencia a la tracción, el alargamiento y la dureza.

Los resultados metalográficos conseguidos con el tratamiento térmico se presentan mediante las siguientes fotomicrografías tomadas a 100 X y 400 X y el reactivo de ataque para la probeta fue una solución de HF al 2%. Los resultados metalográficos se presentaran de acuerdo a la tabla 9, la probeta de fundición es aquella a la que no se le sometió a ningún tratamiento térmico es decir es la probeta en verde.

Tabla 4. Listado de probetas.

Probeta	Tratamiento Térmico
1.	Fundición (verde)
2.	Solución
3.	185°C 0 horas de envejecimiento natural
4.	185°C 12 horas de envejecimiento natural
5.	185°C 20 horas de envejecimiento natural
6.	155°C 6 horas de envejecimiento artificial
7.	170°C 6 horas de envejecimiento artificial
8.	185°C 6 horas de envejecimiento artificial
9.	236°C 6 horas de envejecimiento artificial

5.1.1 ESTRUCTURA METALOGRÁFICA EN VERDE.

Los resultados obtenidos con el análisis metalográfico de la probeta en verde, esto es, sin tratamiento térmico, la fotomicrografía muestra la estructura de la probeta en verde la cual corresponde a una estructura con solidificación normal, y sirve como patrón de comparación para determinar el efecto del tratamiento térmico en la estructura de las demás probetas.

PROBETA EN VERDE (1).

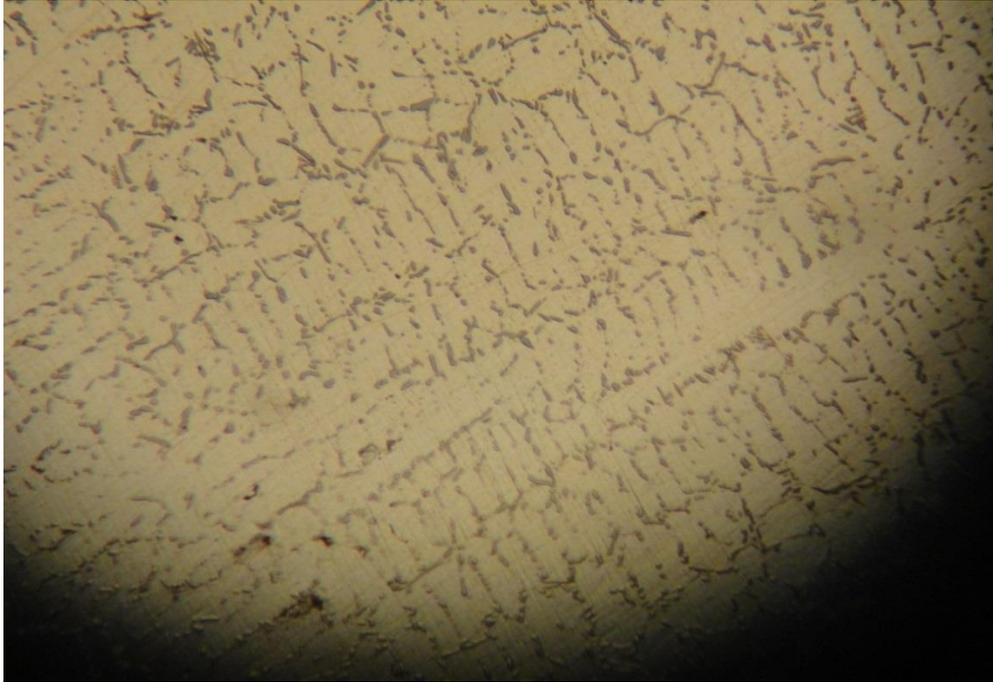


Figura 43. Fotomicrografía a 100X de la probeta 1.

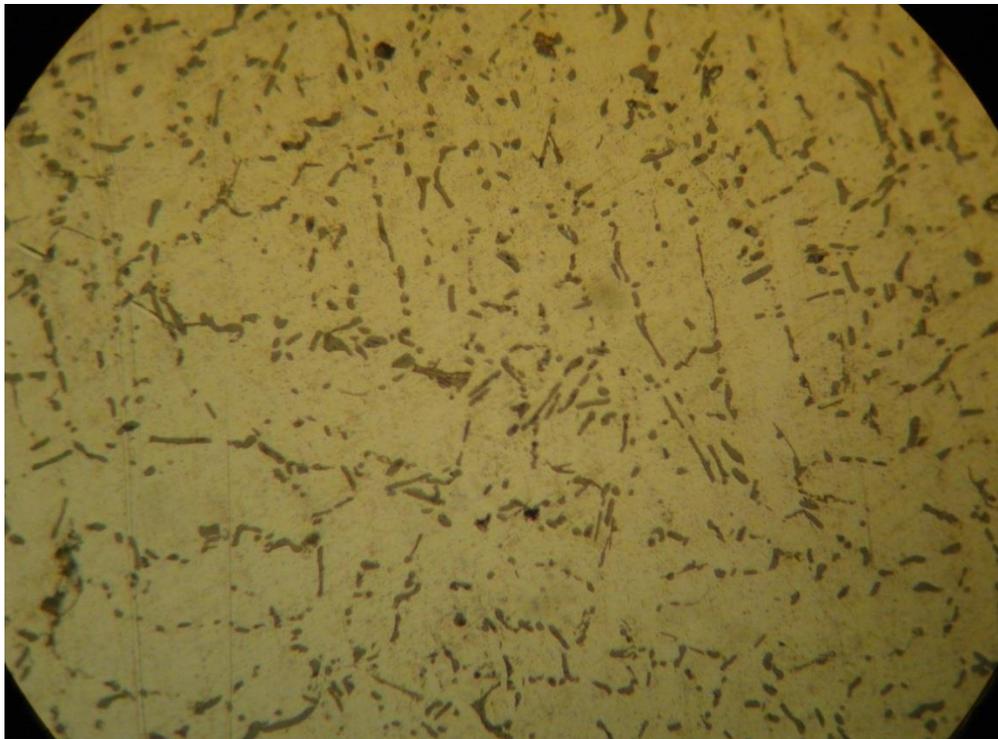


Figura 44. Fotomicrografía a 400X de la probeta 1.

5.1.2 ESTRUCTURAS METALOGRAFICAS CON TRATAMIENTO TERMICO.

En este apartado se presentan las fotomicrografías más representativas de las probetas tratadas térmicamente con tratamiento térmico de solución y temple, envejecimiento natural y envejecimiento artificial respectivamente.

PROBETA SOMETIDA A TRATAMIENTO TERMICO DE SOLUCIÓN (2).

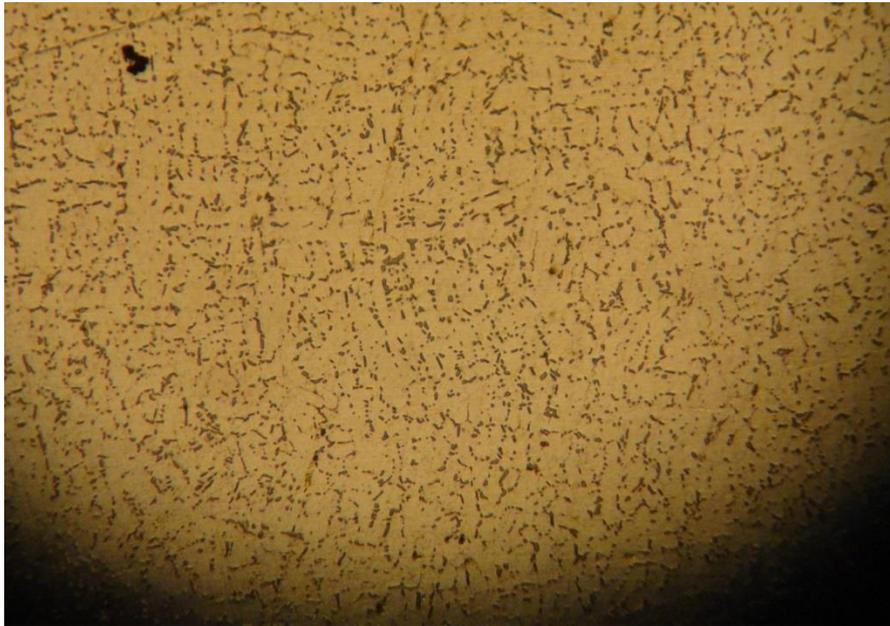


Figura 45. Fotomicrografía a 100X de la probeta 2.

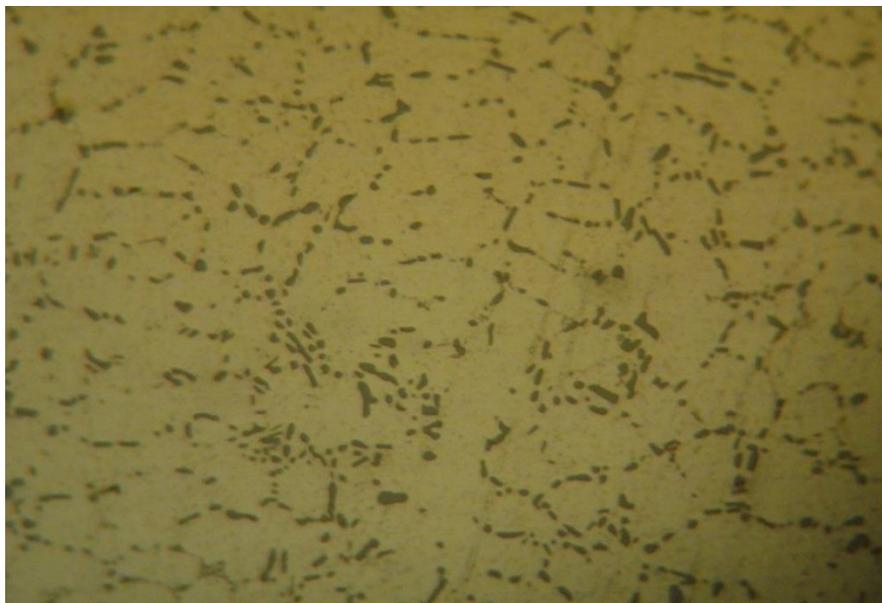


Figura 46. Fotomicrografía a 400X de la probeta 2.

PROBETA SOMETIDA A 0 HORAS DE ENVEJECIMIENTO NATURAL Y POSTERIORMENTE A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 185 °C (3).

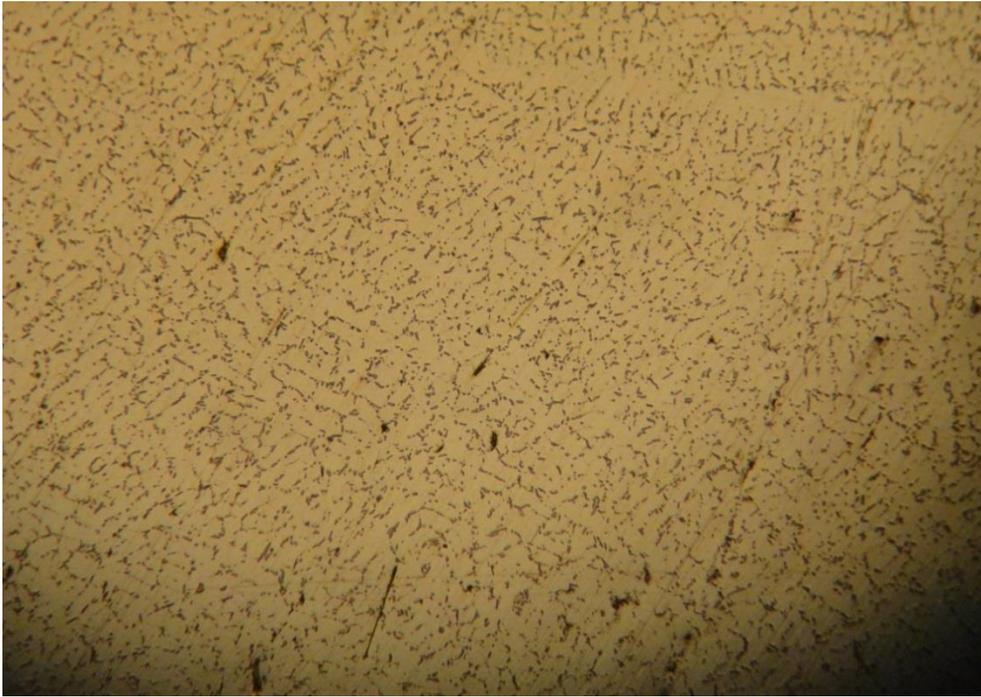


Figura 47. Fotomicrografía a 100X de la probeta 3.

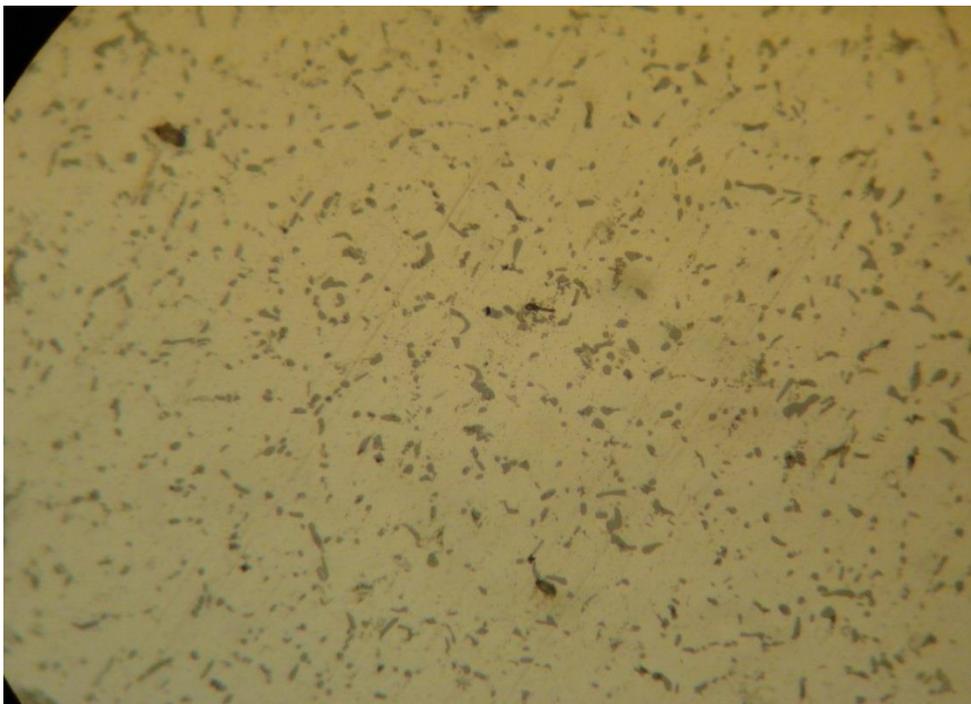


Figura 48. Fotomicrografía a 400X de la probeta 3.

PROBETA SOMETIDA A 12 HORAS DE ENVEJECIMIENTO NATURAL Y POSTERIORMENTE A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 185 °C (4).

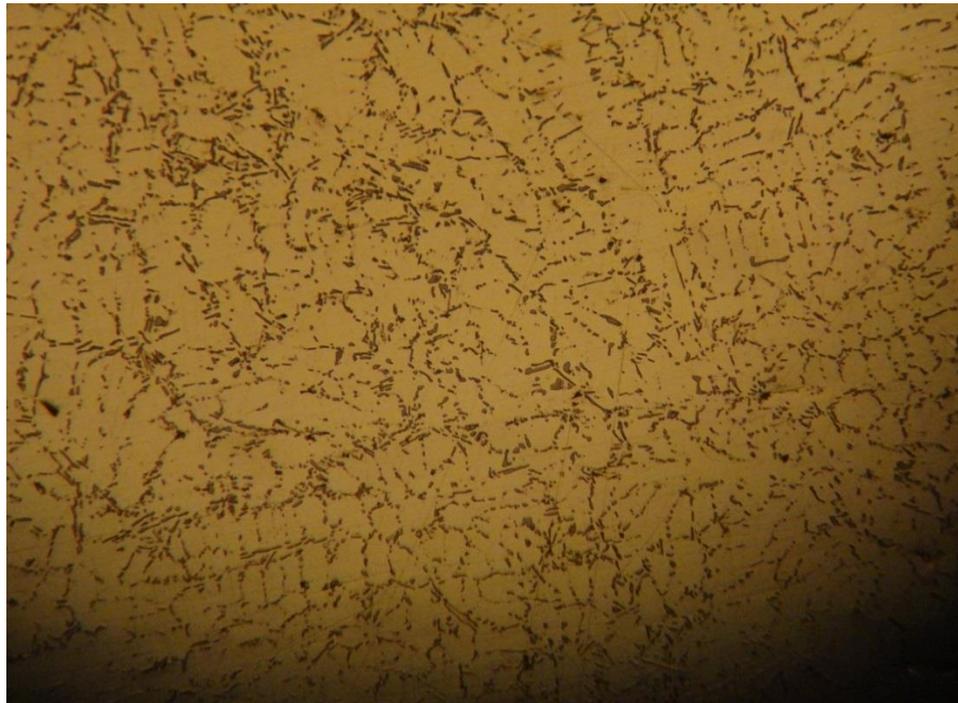


Figura 49. Fotomicrografía a 100X de la probeta 4.

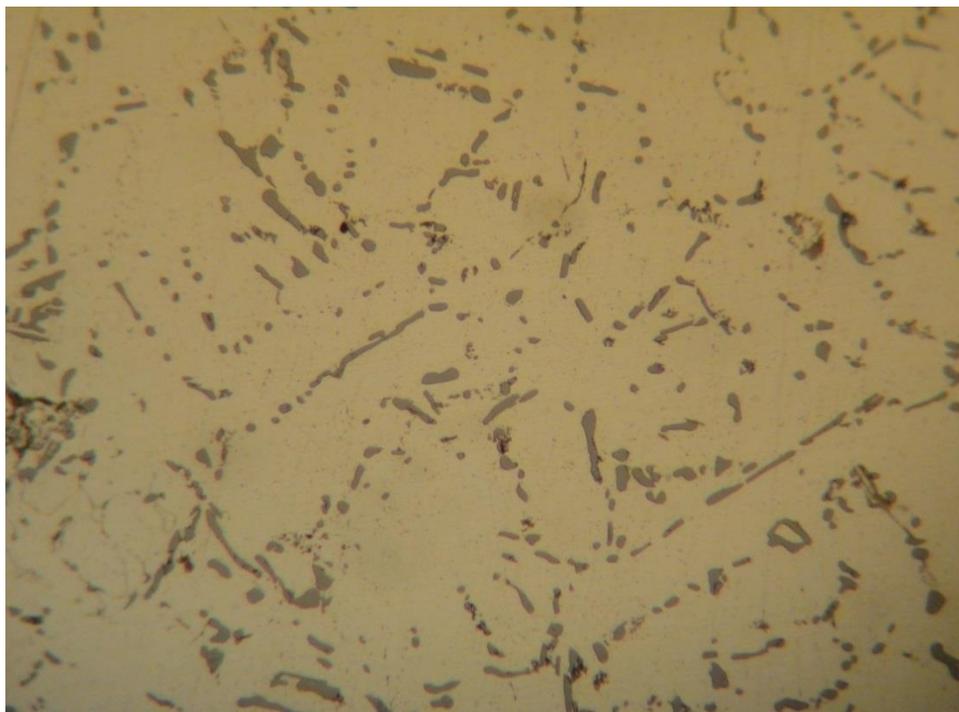


Figura 50. Fotomicrografía a 400X de la probeta 4.

PROBETA SOMETIDA A 20 HORAS DE ENVEJECIMIENTO NATURAL Y POSTERIORMENTE A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A 185 °C (5).

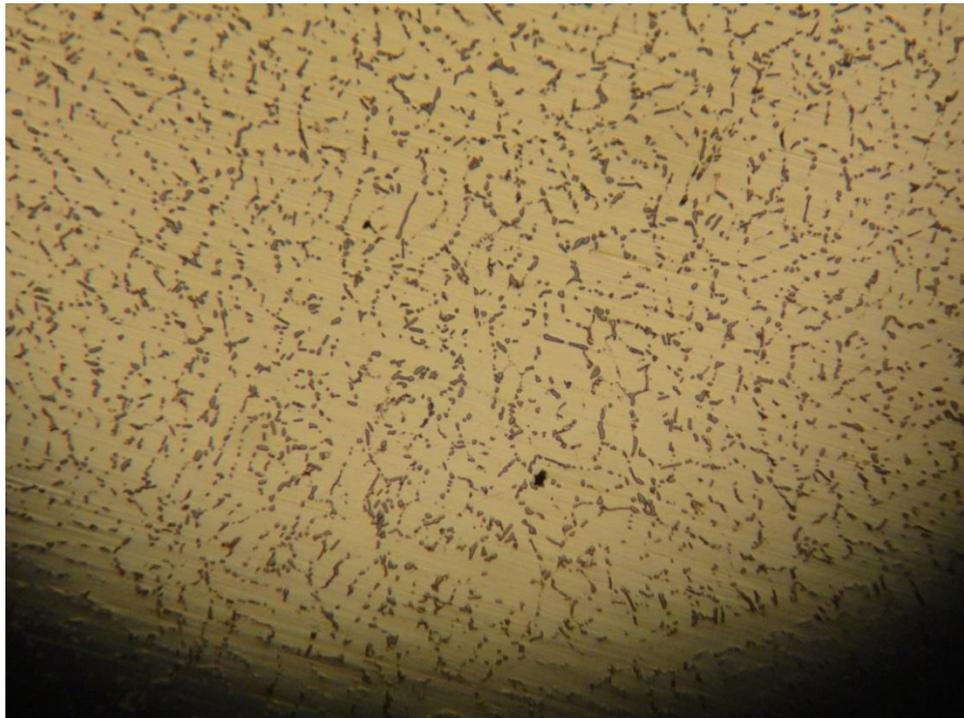


Figura 51. Fotomicrografía a 100X de la probeta 5.



Figura 52. Fotomicrografía a 400X de la probeta 5.

PROBETA SOMETIDA A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL DURANTE 6 HORAS. A 155 °C (6).

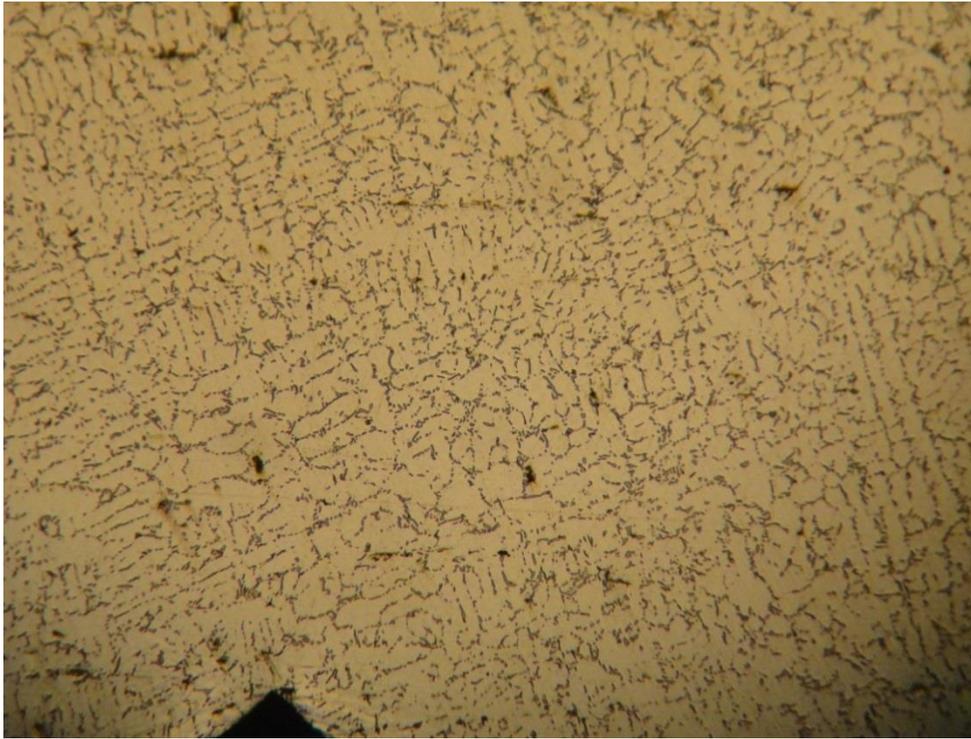


Figura 53. Fotomicrografía a 100X de la probeta 6.

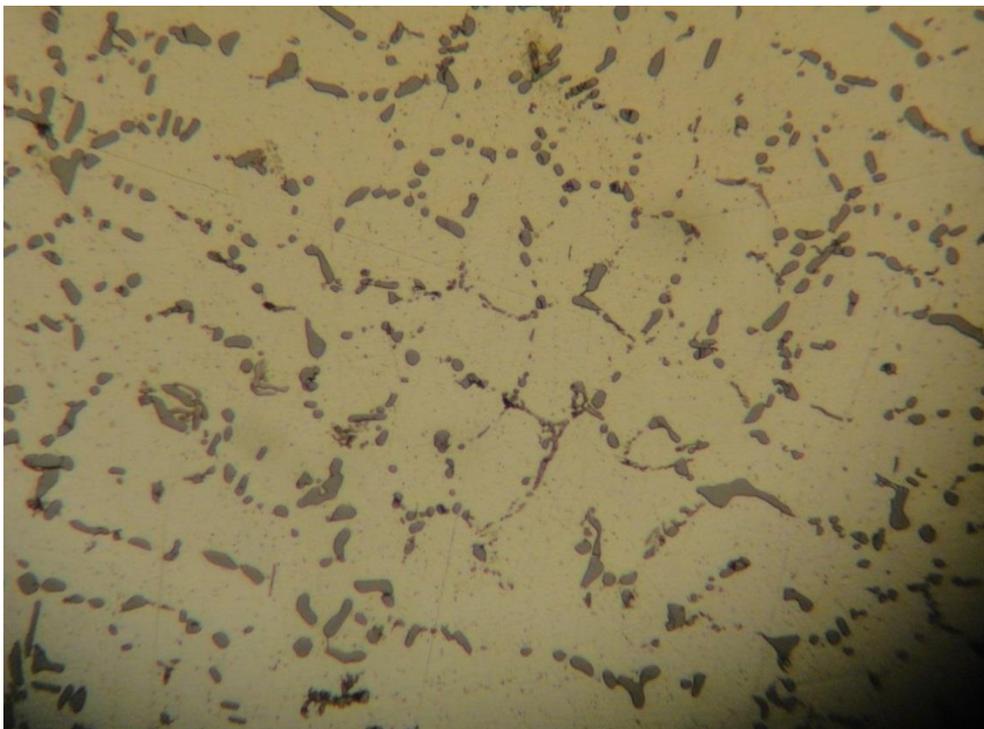


Figura 54. Fotomicrografía a 400X de la probeta 6.

PROBETA SOMETIDA A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL DURANTE 6 HORAS. A 170 °C (7).

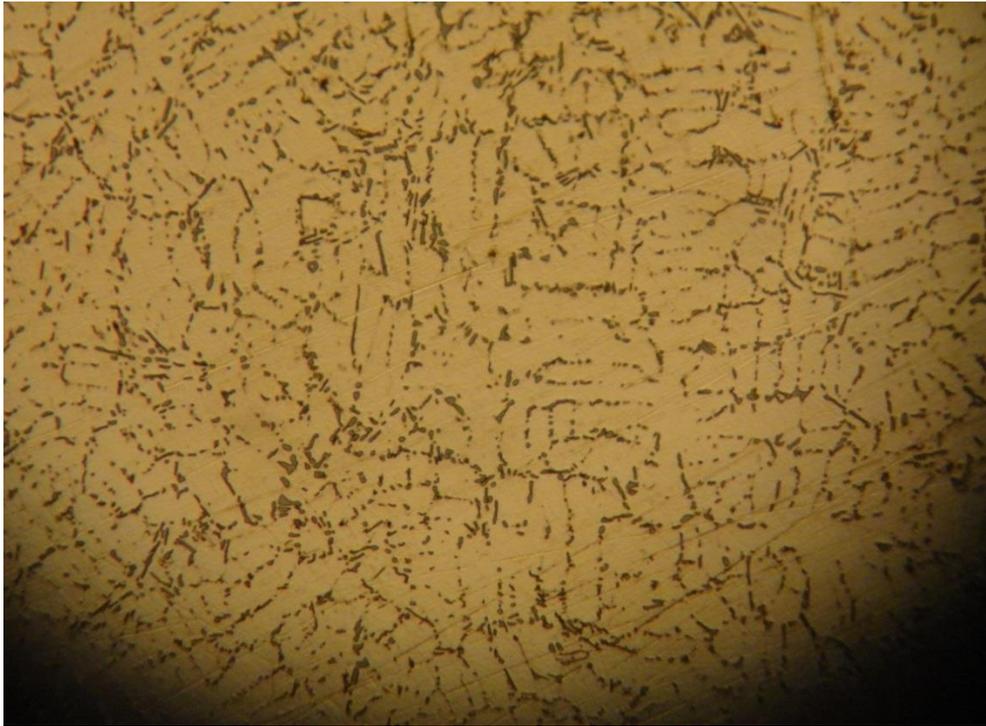


Figura 55. Fotomicrografía a 100x de la probeta 7.

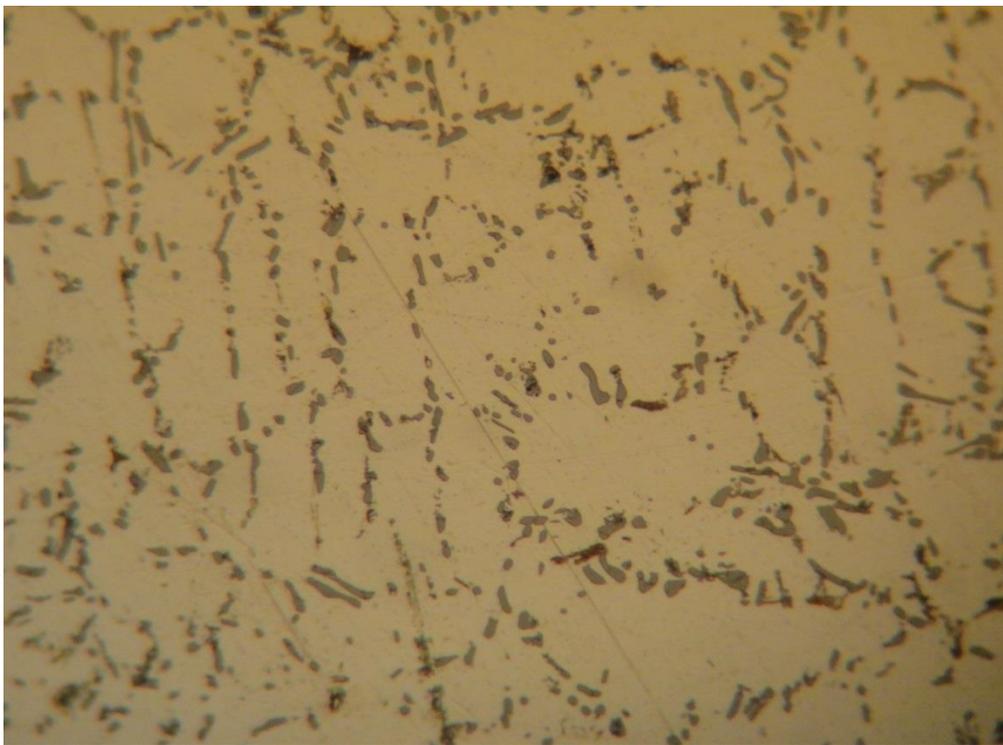


Figura 56. Fotomicrografía a 400X de la probeta 7.

PROBETA SOMETIDA A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL DURANTE 6 HORAS. A 185 °C (8).

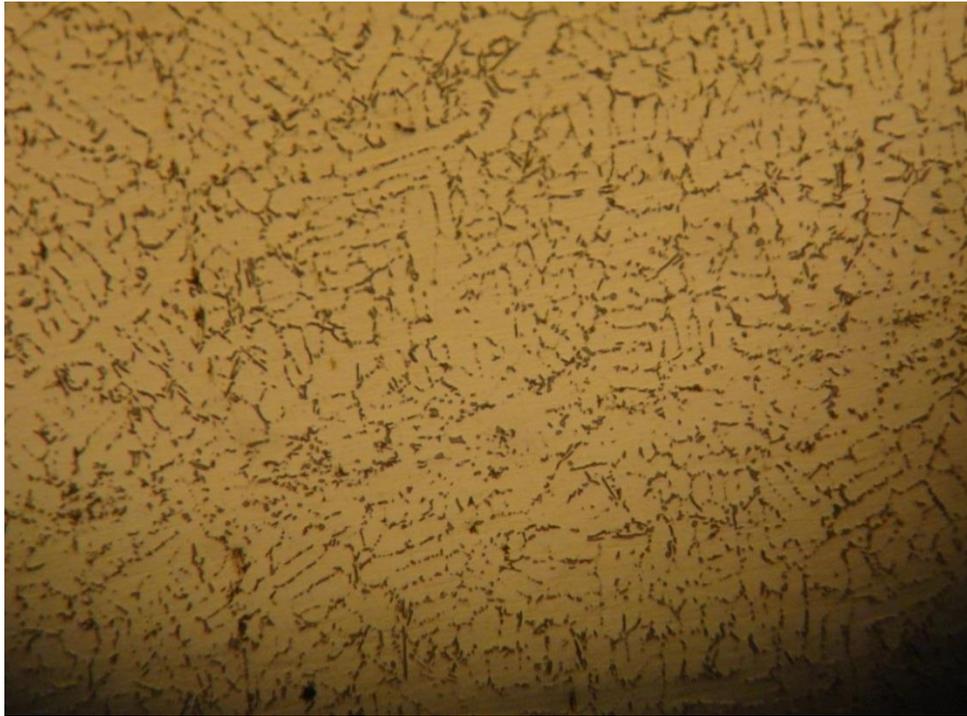


Figura 57. Fotomicrografía a 100X de la probeta 8.

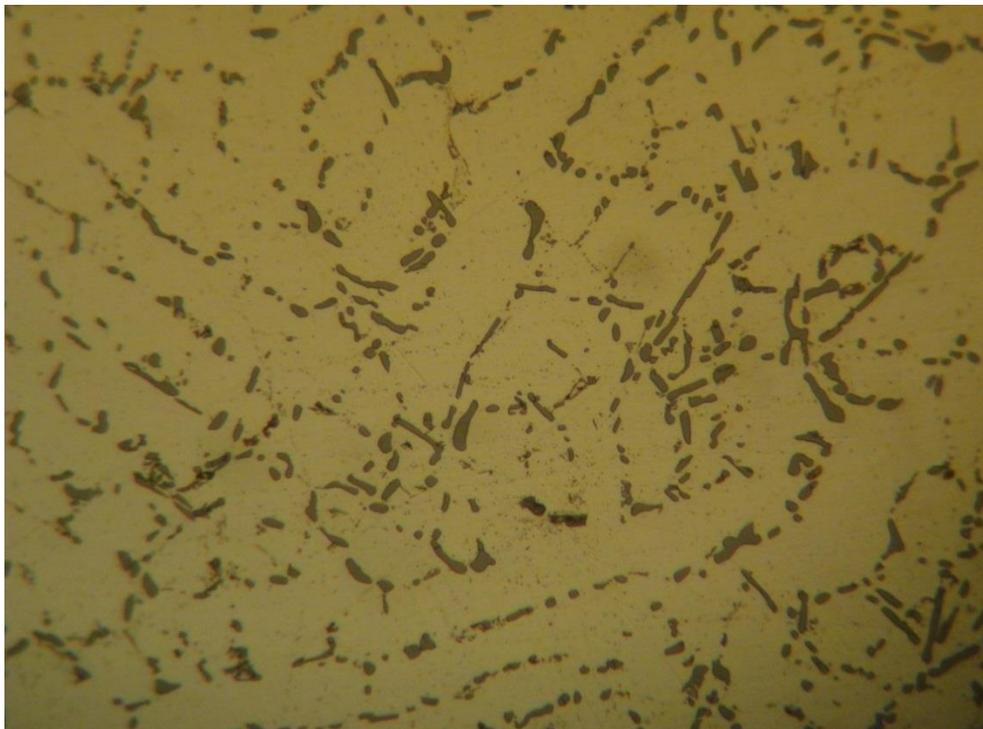


Figura 58. Fotomicrografía a 400X de la probeta 8.

PROBETA SOMETIDA A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL DURANTE 6 HORAS. A 236 °C (9).

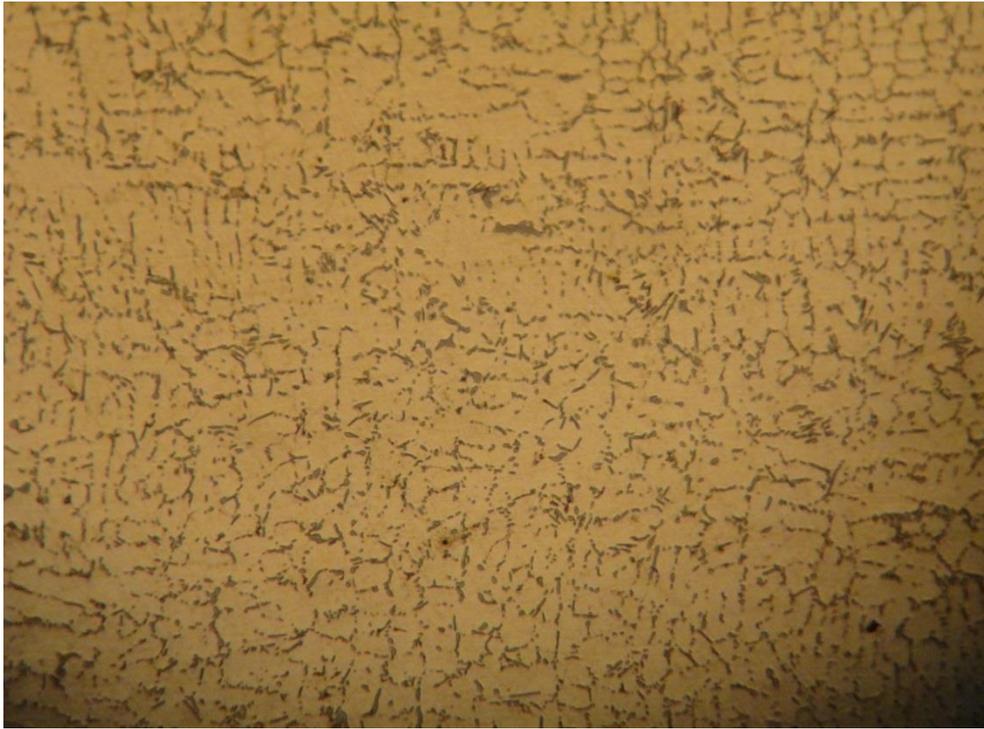


Figura 59. Fotomicrografía a 100X de la probeta 9.

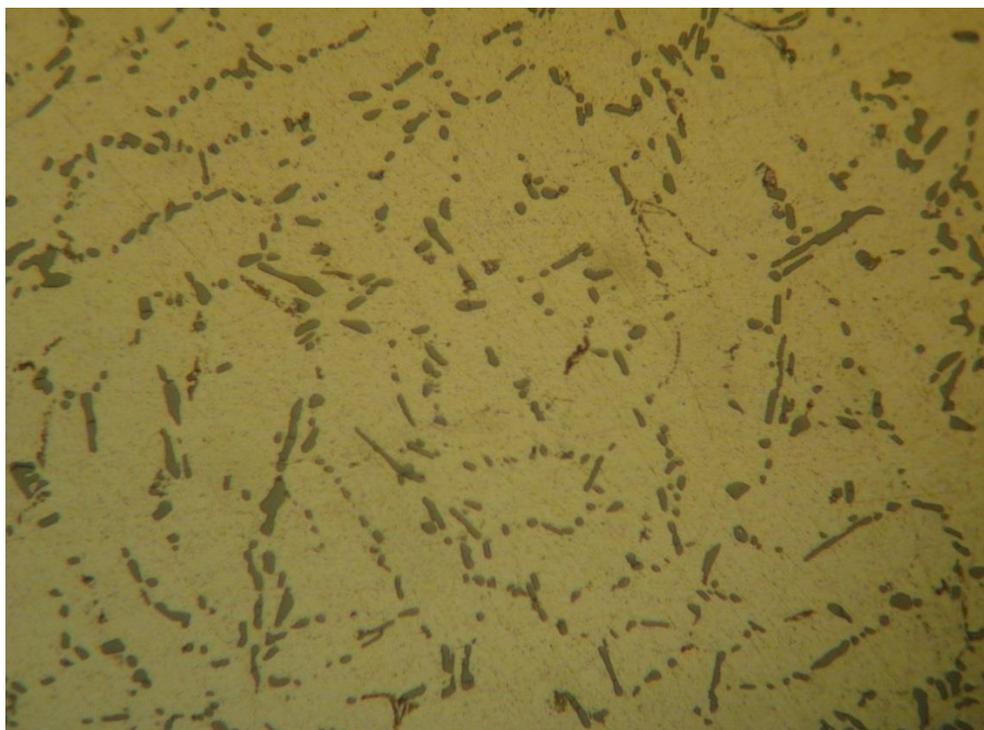


Figura 60. Fotomicrografía a 400X de la probeta 9.

5.2 PROPIEDADES DE TENSIÓN Y DUREZA.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas de la probeta en verde y las probetas tratadas térmicamente. Con los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas de cada probeta, se realizaron graficas de la propiedad media es decir resistencia a la tracción, porcentaje de elongación, módulo de Young, porcentaje de reducción de área, dureza Vickers y deformación unitaria, contra los tiempos, temperaturas y tipos de tratamiento térmico.

Tabla 5. Datos obtenidos al medir las dimensiones de la probeta antes y después de los ensayos.

Probeta	diametro inicial (mm)	diametro final (mm)	Lo galga (mm)	Lf galga (mm)	radio inicial (mm)	radio final (mm)
Fundición I	10.26	10.2	68.04	-----	5.13	5.1
Solución I	10.01	9.7	64.42	65.2	5.005	4.85
185° 0Hrs I	11	10.9	65.67	66.1	5.5	5.45
185° 12Hrs II	11.17	11.1	66.48	66.58	5.585	5.55
185° 20Hrs II	11.48	11.3	62.67	63.47	5.74	5.65
155° 6Hrs II	10.4	10.2	66.24	69	5.2	5.1
170° 6Hrs II	10.79	10.68	61.68	63	5.395	5.34
185° 6Hrs I	10.06	9.9	66.53	67	5.03	4.95
236° 6Hrs I	10.26	10.1	68.7	69.15	5.13	5.05

La probeta de fundición, es la probeta en verde es decir la que no fue sometida a ningún tratamiento térmico después de ser colada, la probeta de solución fue aquella que como su nombre lo indica fue sometida solamente al tratamiento térmico de solución y temple, las probetas de 185° 0 horas, 185° 12 horas y 185° 20 horas son las probetas sometidas a tratamiento térmico de solución, temple, posteriormente a envejecimiento natural durante los tiempos establecidos en la probeta y por último se les aplico un tratamiento térmico de envejecimiento artificial de 6 horas a 185°, las probetas de 155° 6 horas, 170° 6horas, 185° 6 horas y 236° 6 horas, son aquellas probetas sometidas a tratamiento térmico de solución, temple y posteriormente tratamiento térmico de envejecimiento artificial a la temperatura y horas que marca la probeta.

Tabla 6. En la tabla muestra las características calculadas mediante los valores de la tabla 5 y otros obtenidos directamente de los ensayos efectuados a las probetas.

Probeta	Ao (mm ²)	Af (mm ²)	Fuerza (Kg)	Esfuerzo (Kg/mm ²)	%RA (%)	%E (%)	M. Young (Kg/mm)	Def. Uni.(mm)
Fundición I	82.67698	81.71282	1231	14.88927153	1.16617		76.8777	0.193674779
Solución I	78.69697	73.89811	1230	15.62957163	6.0979	1.2108	68.5871	0.227879173
185° 0Hrs I	95.03318	93.31316	1951	20.52967233	1.80992	0.6548	120.6127	0.170211531
185° 12Hrs II	97.99326	96.76891	1832	18.69516238	1.24943	0.1504	124.2093	0.150513387
185° 20Hrs II	103.5079	100.2875	2630	25.40867926	3.1113	1.2765	157.3046	0.161525342
155° 6Hrs II	84.94867	81.71282	1384	16.2921924	3.80917	4.1667	132.0125	0.123414013
170° 6Hrs II	91.43927	89.5844	1867	20.41792232	2.02853	2.1401	129.9433	0.157129474
185° 6Hrs I	79.48512	76.97687	1484	18.67016079	3.15562	0.7064	129.5148	0.144154651
236° 6Hrs I	82.67698	80.11847	1285	15.54241585	3.09459	0.655	95.2757	0.163130954

El área inicial (Ao) se obtuvo mediante la fórmula $Ao = \pi r_o^2$

El área final (Af) se obtuvo mediante la fórmula $Af = \pi r_f^2$

La fuerza se obtuvo directamente del ensayo de tensión como el punto máximo de carga.

El esfuerzo se obtuvo mediante la siguiente fórmula $\sigma = \frac{F}{Ao}$, y a continuación se presenta la gráfica esfuerzo vs tratamiento térmico.

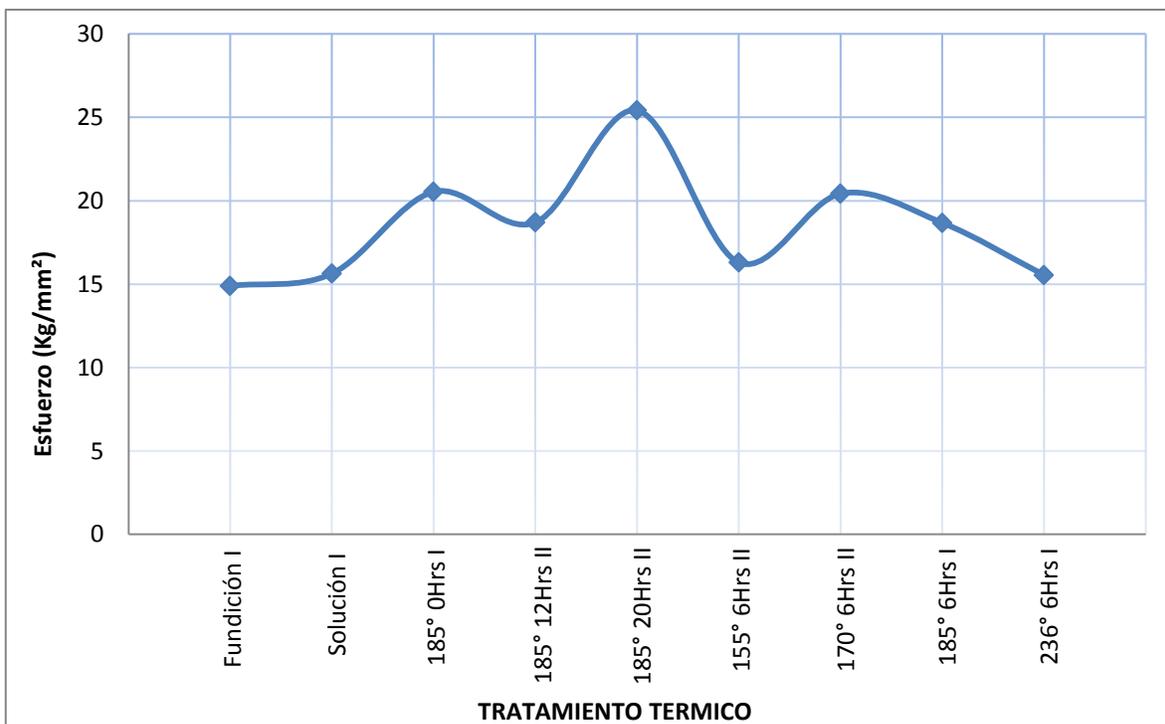


Figura 61. Grafica esfuerzo vs tratamiento termico.

El porcentaje de reducción de área (%RA) se obtuvo mediante la fórmula $\%RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} (100)$.

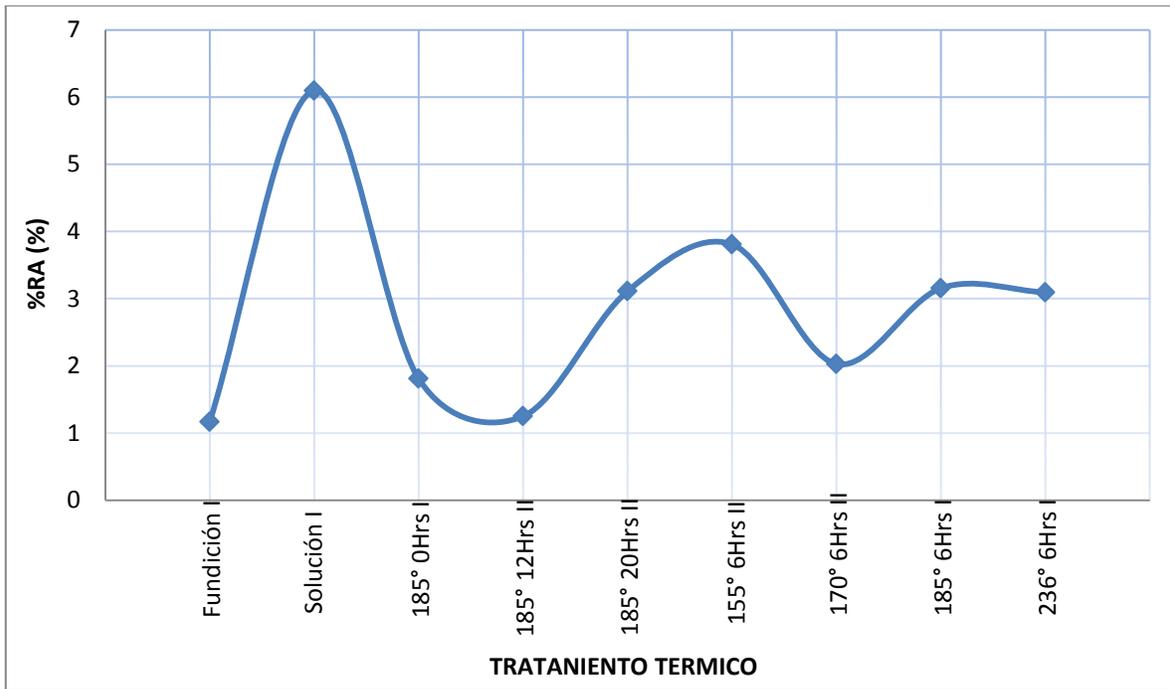


Figura 62. Gráfica porcentaje de reducción de área vs tratamiento térmico.

El porcentaje de elongación se calculó gracias a la fórmula $\%E = \frac{L_f - L_o}{L_o} (100)$.

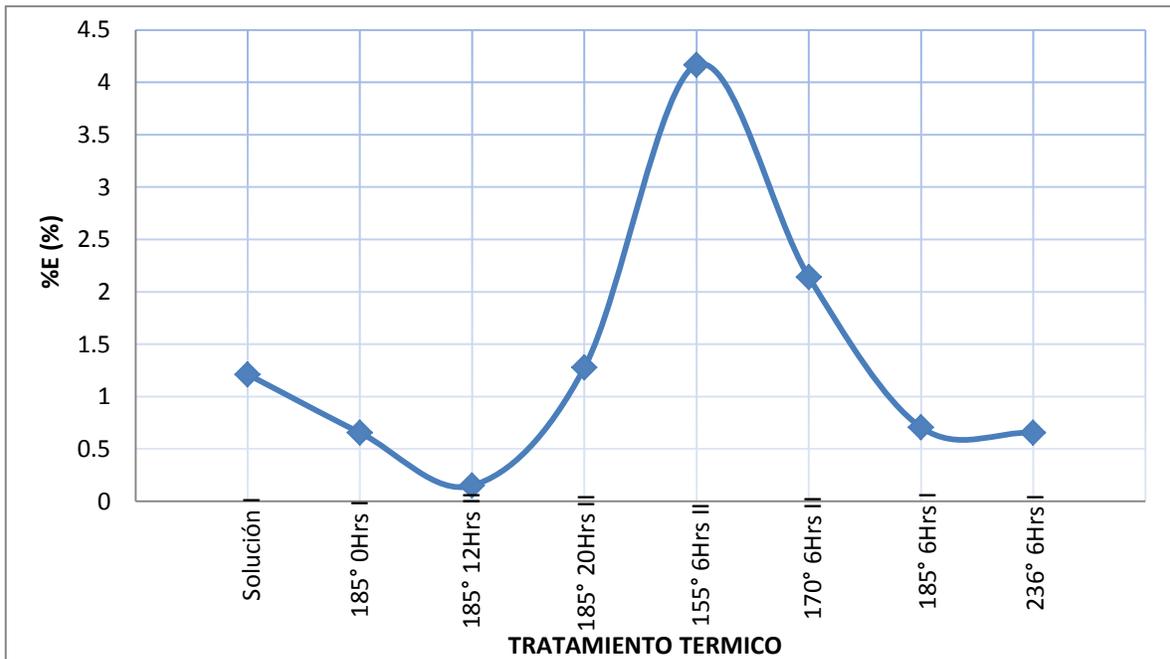


Figura 63. Gráfica porcentaje de elongación vs tratamiento térmico.

El Modulo de Young (E) se obtuvo de manera directa de los datos arrojados del ensayo de tensión.

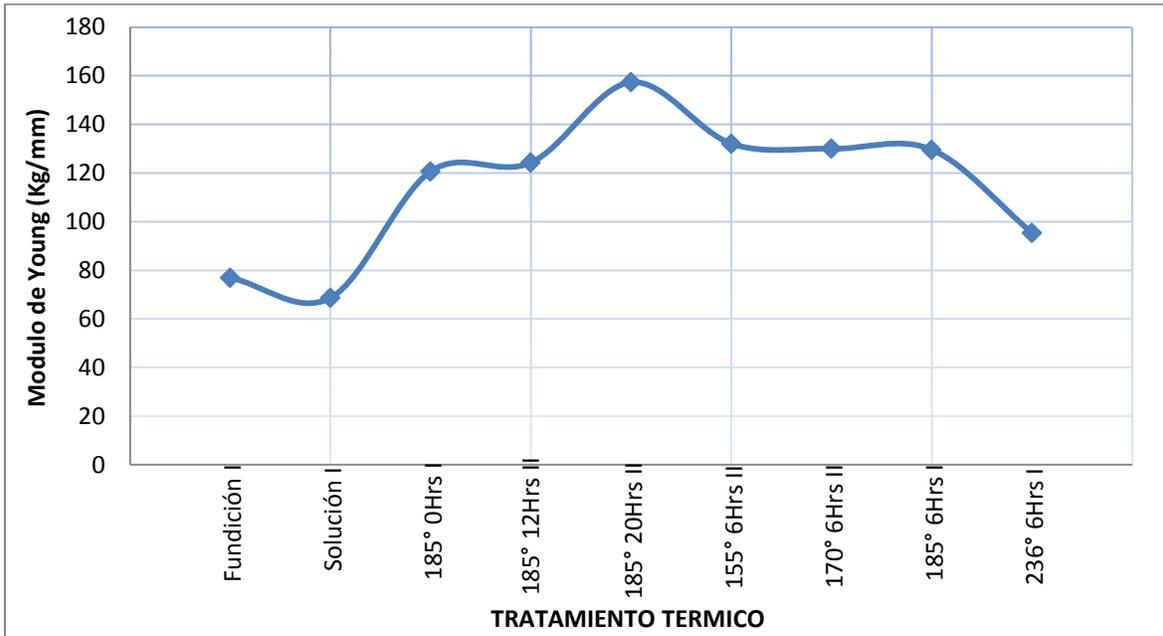


Figura 64. Gráfica Modulo de Young vs tratamiento térmico.

La deformación unitaria se obtuvo utilizando la siguiente formula $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$

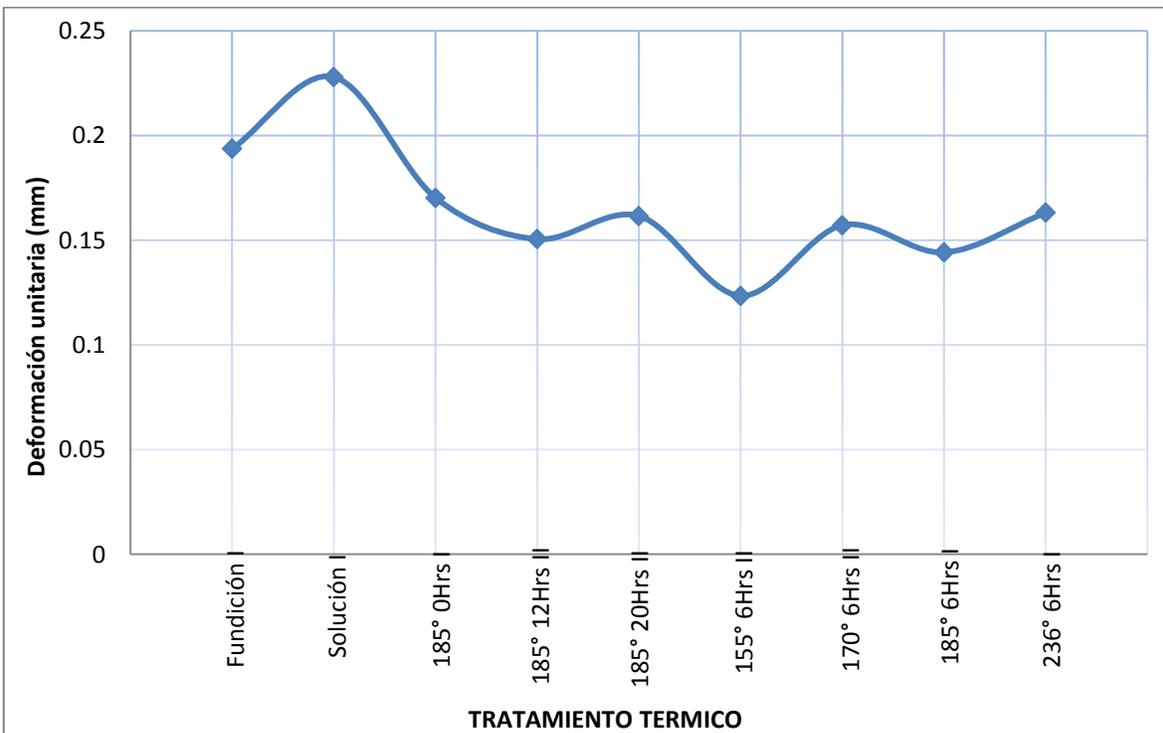
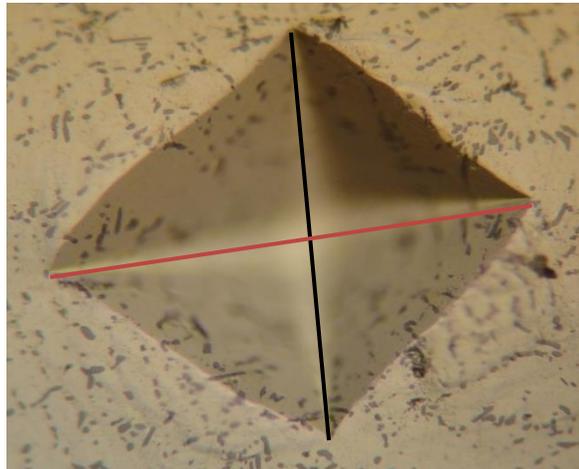


Figura 65. Gráfica deformación unitaria vs tratamiento térmico.

Para los resultados de la dureza Vickers se realizaron tres pruebas en cada una de las muestras obteniendo las diagonales necesarias para calcular el valor de dureza Vickers el cual consistió en obtener de cada una de las pruebas a las probetas la medida de las diagonales de la marca dejada por el indentador como se muestra en la figura 66.



- Diagonal 1 (D1)
- Diagonal 2 (D2)

Figura 66. Imagen a 100 X de la marca dejada por el indentador en una de las muestras durante la prueba de dureza Vickers.

Con la medida de cada una de las diagonales se sacaba el promedio de ambas y con el valor promedio de las diagonales se obtiene el valor de la dureza Vickers con ayuda de la tabla 7.

Tabla 7. Tabla para la obtención de la dureza Vickers en función del valor obtenido del promedio de las diagonales, para la pruebas realizadas con una carga de 2 Kg.

Vickers HV 2

F = 19,61 N \cong 2 kp

Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	371	364	357	350	343	336	330	324	318	312
0,11	307	301	296	290	285	280	276	271	266	262
0,12	258	253	249	245	241	237	234	230	226	223
0,13	219	216	213	210	207	204	201	198	195	192
0,14	189	187	184	181	179	176	174	172	169	167
0,15	165	163	161	158	156	154	152	151	149	147
0,16	145	143	141	140	138	136	135	133	131	130
0,17	128	127	125	124	123	121	120	118	117	116
0,18	115	113	112	111	110	108	107	106	105	104
0,19	103	102	101	100	98,5	97,5	96,5	95,6	94,6	93,7
0,20	92,7	91,8	90,9	90,0	89,1	88,3	87,4	86,6	85,7	84,9
0,21	84,1	83,3	82,5	81,8	81,0	80,2	79,5	78,8	78,0	77,3
0,22	76,6	75,9	75,3	74,6	73,9	73,3	72,6	72,0	71,3	70,7
0,23	70,1	69,5	68,9	68,3	67,7	67,2	66,6	66,0	65,5	64,9
0,24	64,4	63,9	63,3	62,8	62,3	61,8	61,3	60,8	60,3	59,8
0,25	59,3	58,9	58,4	57,9	57,5	57,0	56,6	56,1	55,7	55,3
0,26	54,9	54,4	54,0	53,6	53,2	52,8	52,4	52,0	51,6	51,2
0,27	50,9	50,5	50,1	49,8	49,4	49,0	48,7	48,3	48,0	47,6
0,28	47,3	47,0	46,6	46,3	46,0	45,7	45,3	45,0	44,7	44,4
0,29	44,1	43,8	43,5	43,2	42,9	42,6	42,3	42,0	41,8	41,5
0,30	41,2	40,9	40,7	40,4	40,1	39,9	39,6	39,3	39,1	38,8
0,31	38,6	38,3	38,1	37,8	37,6	37,4	37,1	36,9	36,7	36,4
0,32	36,2	36,0	35,8	35,5	35,3	35,1	34,9	34,7	34,5	34,3
0,33	34,0	33,8	33,6	33,4	33,2	33,0	32,8	32,6	32,5	32,3
0,34	32,1	31,9	31,7	31,5	31,3	31,2	31,0	30,8	30,6	30,4
0,35	30,3	30,1	29,9	29,8	29,6	29,4	29,3	29,1	28,9	28,8
0,36	28,6	28,5	28,3	28,1	28,0	27,8	27,7	27,5	27,4	27,2
0,37	27,1	26,9	26,8	26,7	26,5	26,4	26,2	26,1	26,0	25,8
0,38	25,7	25,5	25,4	25,3	25,1	25,0	24,9	24,8	24,6	24,5
0,39	24,4	24,3	24,1	24,0	23,9	23,8	23,6	23,5	23,4	23,3
0,40	23,2	23,1	22,9	22,8	22,7	22,6	22,5	22,4	22,3	22,2
0,41	22,1	22,0	21,8	21,7	21,6	21,5	21,4	21,3	21,2	21,1
0,42	21,0	20,9	20,8	20,7	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1
0,43	20,1	20,0	19,9	19,8	19,7	19,6	19,5	19,4	19,3	19,2
0,44	19,2	19,1	19,0	18,9	18,8	18,7	18,6	18,6	18,5	18,4
0,45	18,3	18,2	18,1	18,1	18,0	17,9	17,8	17,8	17,7	17,6
0,46	17,5	17,4	17,4	17,3	17,2	17,1	17,1	17,0	16,9	16,9
0,47	16,8	16,7	16,6	16,6	16,5	16,4	16,4	16,3	16,2	16,2
0,48	16,1	16,0	16,0	15,9	15,8	15,8	15,7	15,6	15,6	15,5
0,49	15,4	15,4	15,3	15,3	15,2	15,1	15,1	15,0	15,0	14,9
0,50	14,8	14,8	14,7	14,7	14,6	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3
0,51	14,3	14,2	14,1	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,8	13,8
0,52	13,7	13,7	13,6	13,6	13,5	13,5	13,4	13,4	13,3	13,3
0,53	13,2	13,2	13,1	13,1	13,0	13,0	12,9	12,9	12,8	12,8
0,54	12,7	12,7	12,6	12,6	12,5	12,5	12,4	12,4	12,3	12,3
0,55	12,3	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	11,9	11,9
0,56	11,8	11,8	11,7	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5	11,5	11,5
0,57	11,4	11,4	11,3	11,3	11,3	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1
0,58	11,0	11,0	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7
0,59	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,3
0,60	10,3	10,3	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0

Tabla 8. Resultados de la dureza Vickers para cada una de las muestras.

Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	Dprom (mm)	Dureza vickers (HV)	Promedio
Fundición 1	0.24	0.24	0.24	64.4	50.2
	0.3	0.3	0.3	41.2	
	0.28	0.295	0.2875	45	
Solución I	0.22	0.225	0.2225	75.3	75.8
	0.215	0.22	0.2175	78.8	
	0.22	0.23	0.225	73.3	
185° 0Hrs II	0.235	0.23	0.2325	68.9	77.5
	0.21	0.2	0.205	88.3	
	0.22	0.225	0.2225	75.3	
185° 12 Hrs II	0.2	0.2	0.2	92.7	86.3
	0.21	0.195	0.2025	90.9	
	0.225	0.22	0.2225	75.3	
185° 20 Hrs II	0.205	0.185	0.195	97.5	96.8666667
	0.2	0.195	0.1975	95.6	
	0.2	0.19	0.195	97.5	
155° 6 Hrs I	0.23	0.24	0.235	67.2	70.83333333
	0.22	0.23	0.225	73.3	
	0.22	0.235	0.2275	72	
170° 6 Hrs I	0.18	0.225	0.2025	90.9	88.63333333
	0.19	0.215	0.2025	90.9	
	0.2	0.22	0.21	84.1	
185° 6 Hrs II	0.21	0.19	0.2	92.7	92.1
	0.21	0.195	0.2025	90.9	
	0.2	0.2	0.2	92.7	
236° 6 Hrs II	0.24	0.24	0.24	64.4	61.83333333
	0.245	0.245	0.245	61.8	
	0.25	0.25	0.25	59.3	

Con el valor de dureza Vickers de cada una de las tres pruebas hechas a las muestras se realizó el promedio de los tres valores para proceder a realizar las gráficas de dureza Vickers vs tratamiento térmico.

Para empezar tenemos la gráfica (figura 67) de dureza Vickers para las muestras que fueron sometidas a solución, temple, envejecimiento natural y envejecimiento artificial, en la cual

también se graficaron los valores de la muestra en verde y la muestra que solo se sometió a tratamiento térmico de solución y temple, para tener un punto de comparación.

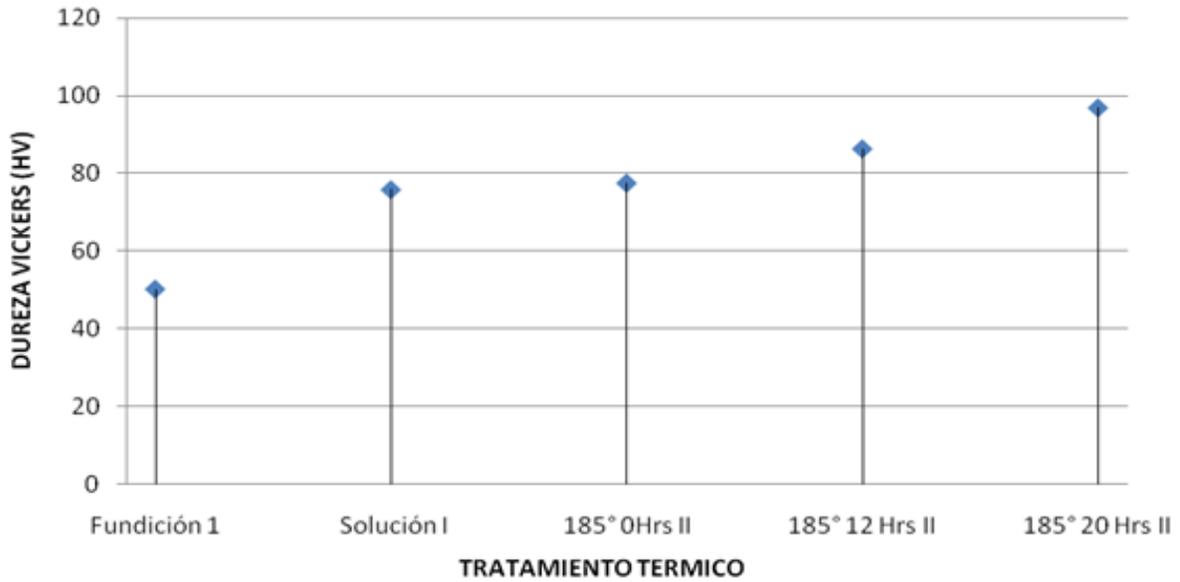


Figura 67. Gráfica Dureza Vickers vs Tratamiento térmico envejecimiento natural.

A continuación se muestra la gráfica (figura 68) de dureza Vickers para las muestras que fueron sometidas a solución, temple y envejecimiento artificial, en esta grafica también se muestran los valores de la muestra en verde y la muestra que solo se sometió a tratamiento térmico de solución y temple, para tener un punto de comparación.

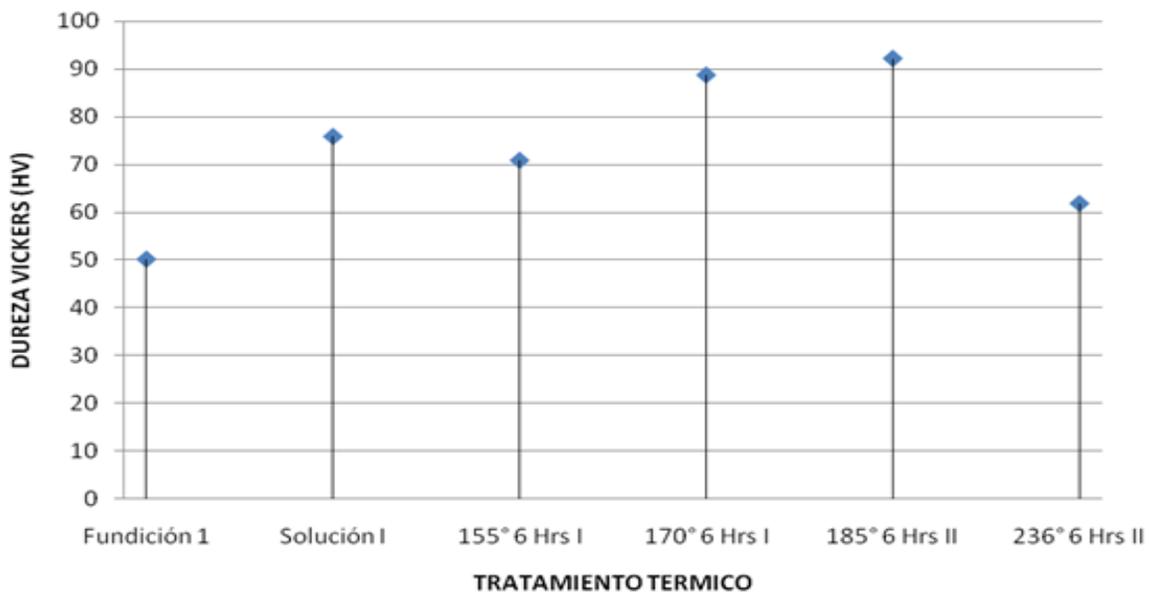


Figura 68. Gráfica Dureza Vickers vs Tratamiento termico de envejecimiento artificial.

Por último se muestran todos los valores de las muestras graficados para poder comparar todos los valores obtenidos.

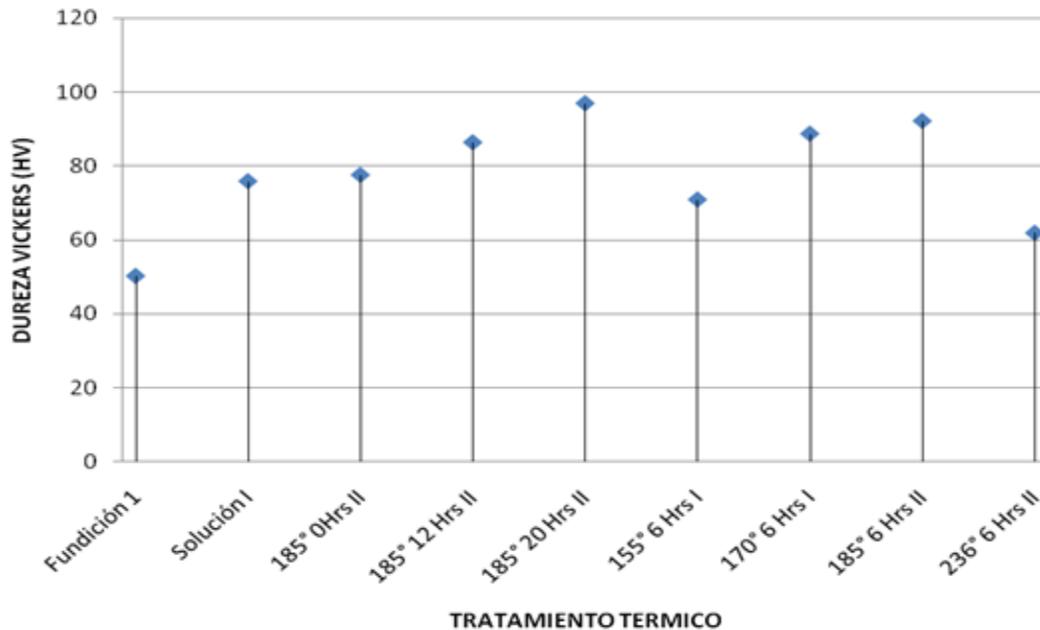


Figura 69. Gráfica Dureza Vickers vs probeta en verde, solución, probetas de envejecimiento natural y probetas de envejecimiento artificial.

Con los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de las probetas podemos desarrollar la siguiente tabla, ordenando las probetas de mayor a menor valor, para identificar las probetas con mejor combinación de características.

Tabla 9. Listado de probetas de mayor a menor valor en función de los resultados obtenidos de los ensayos y pruebas realizados.

	Dureza	Esfuerzo	%RA	%E	Módulo de Young	Deformación Unitaria
1	185° 20Hrs II	185° 20Hrs II	Solución I	155° 6Hrs II	185° 20Hrs II	Solución I
2	185° 6Hrs II	185° 0Hrs II	155° 6Hrs II	170° 6Hrs II	155° 6Hrs II	Fundición I
3	170° 6Hrs II	170° 6Hrs II	185° 6Hrs II	185° 20Hrs II	170° 6Hrs II	185° 0Hrs II
4	185° 12Hrs II	185° 12Hrs II	185° 20Hrs II	Solución I	185° 6Hrs II	236° 6Hrs II
5	185° 0Hrs II	185° 6Hrs II	236° 6Hrs II	185° 6Hrs II	185° 12Hrs II	185° 20Hrs II
6	Solución I	155° 6Hrs II	170° 6Hrs II	185° 0Hrs II	185° 0Hrs II	170° 6Hrs II
7	155° 6Hrs II	Solución I	185° 0Hrs II	236° 6Hrs II	236° 6Hrs II	185° 12Hrs II
8	236° 6Hrs II	236° 6Hrs II	185° 12Hrs II	185° 12Hrs II	Fundición I	185° 6Hrs II
9	Fundición I	Fundición I	Fundición I		Solución I	155° 6Hrs II

CAPITULO 6

DISCUSIÓN.

Se puede considerar que la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas obtenidas después del tratamiento térmico tuvieron un aumento significativo en comparación con su valor en verde, como era de esperarse. Las probetas con mejor combinación de propiedades mecánicas según la tabla 9 fueron las siguientes:

La probeta más consistente en los primeros lugares de la tabla 9 es la probeta 5 esta probeta fue sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 20 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas. Es decir esta probeta tiene la mayoría de los mejores valores en la mayoría de las pruebas, siendo sus principales características su dureza y resistencia a la tracción sin sacrificar demasiado la elasticidad o capacidad de deformación elástica.

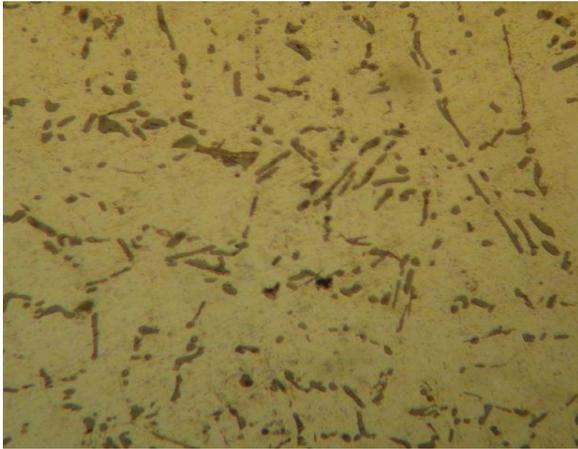
Las probetas con los valores más consistentes o con menos variaciones fueron las probetas 7 y 8, la probeta 7 fue sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 170 °C durante 6 horas; la probeta numero 8 fue la que se sometió a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas. Estas probetas se mantienen cerca del centro de la tabla, esto podría significar que son las probetas con mejor combinación de propiedades ya que los valores de las pruebas no distan mucho unos de otros.

La probeta 3 es aquella sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 0 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas y la probeta 4 sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 12 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas. Son probetas con una dureza relativamente alta y una buena resistencia a la tracción pero con baja capacidad de deformación elástica.

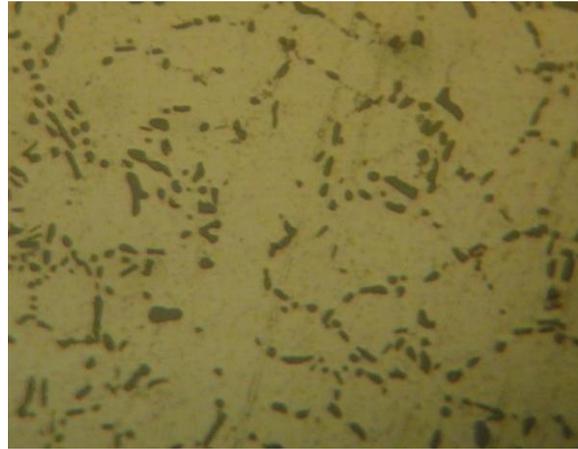
La probeta numero 6 fue la sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 155 °C durante 6 horas, esta probeta tiene bajas características en cuanto a dureza y resistencia pero tiene una muy buena plasticidad.

Las probetas con los valores más bajos o con mayor presencia en los últimos lugares de la tabla 9 son las probetas 1, 2 y 9, la probeta 1 es aquella que no fue modificada es decir es la probeta en verde, esta probeta se encuentra en los lugares más bajos en la mayoría de las pruebas es decir no tiene buenas características mecánicas y físicas. La probeta número 2 es la que fue sometida solamente a tratamiento térmico de solución a 538 °C, esta probeta muestra una buena capacidad de deformación y una aceptable pero no tan buena resistencia a la tracción y dureza, mientras que la probeta número 9 que fue sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 236 °C durante 6 horas, presenta una no muy buena capacidad de deformación y una mala resistencia y dureza.

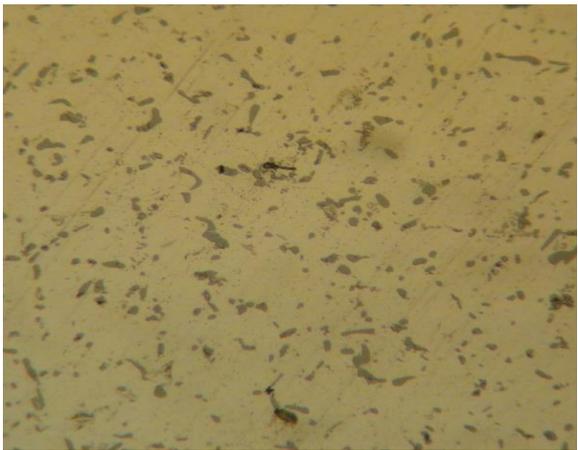
Lo anterior muy probablemente se deba a la morfología y tamaño de las partículas de silicio presentes (cristales), aciculares y de gran tamaño en el caso de as-cast es decir de fundición o en verde y por lo tanto presenten en general bajas propiedades mecánicas comparadas con las que recibieron un tratamiento completo de solución y envejecimiento o en el caso de solo el tratamiento de solución durante el cual y de acuerdo a la literatura se ponen en solución los átomos de solutos presente, Mg y silicio principalmente pero al no darle tratamiento de envejecimiento no se logra la precipitación de siliciuro de magnesio y por lo tanto no se tiene el efecto de servir como barrera al paso de dislocaciones y elevar las propiedades físico-mecánicas, por otro lado en el caso una mayor temperatura en el tratamiento de envejecimiento muy probablemente se origina lo que se denomina un sobre-envejecimiento es decir comienzan a unirse pequeños cristales de siliciuro de magnesio aumentando la distancia entre ellos y disminuyendo o anulando su efecto endurecedor al no servir más como barreras al paso de las dislocaciones generadas al aplicar tensiones al material.



a) Probeta (1)



b) Probeta (2)



c) Probeta (3)

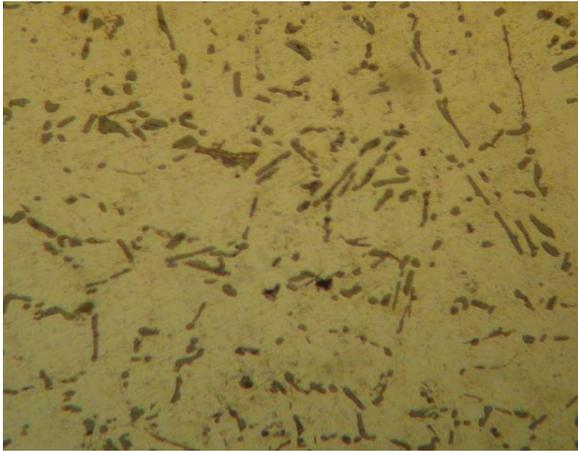


d) Probeta (4)

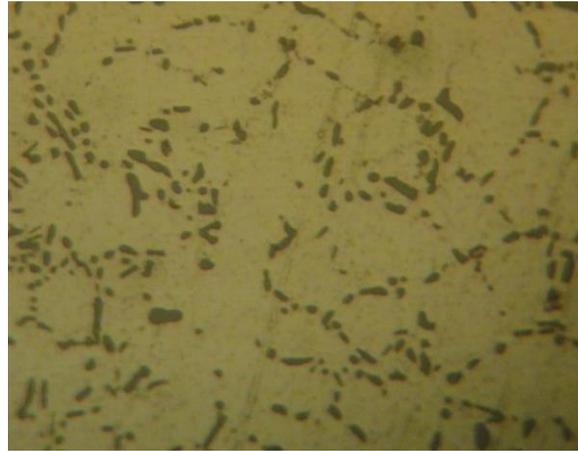


e) Probeta (5)

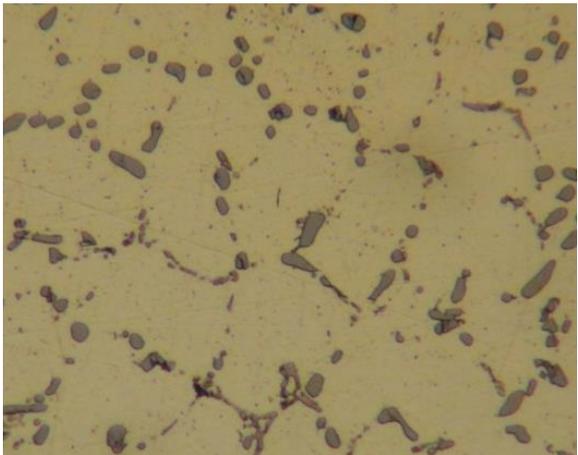
Figura 70. Efecto del tratamiento térmico de solución (probeta 2) y envejecimiento natural a diferentes intervalos de tiempo respectivamente de las probetas 3, 4 y 5, y posterior envejecimiento artificial a 185 °C, teniendo como punto de comparación inicial la estructura metalográfica de la probeta en verde (1).



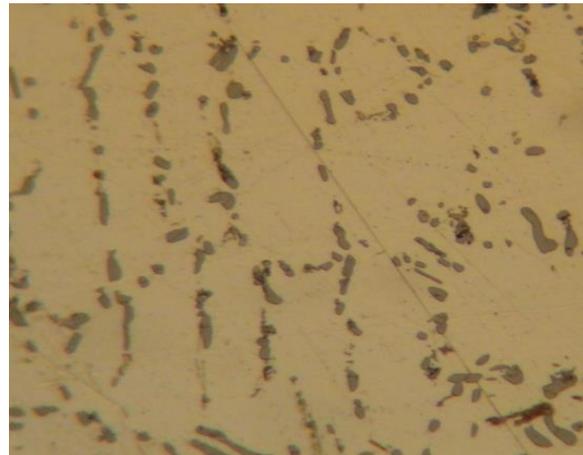
a) Probeta (1)



b) Probeta (2)



f) Probeta (6)



g) Probeta (7)



h) Probeta (8)



i) Probeta (9)

Figura 71. Efecto del tratamiento térmico de solución (probeta 2) y envejecimiento artificial a diferentes temperaturas de las probetas 6, 7, 8 y 9 respectivamente, teniendo como punto de comparación inicial la estructura metalográfica de la probeta en verde (1).

En cuanto a la metalografía se puede observar el efecto del tratamiento térmico de envejecimiento natural y artificial en la estructura metalográfica de la aleación de aluminio 356.

En la figura 70 se puede observar la estructura metalográfica en verde (probeta 1) de la aleación de aluminio 356 en ella podemos ver que la estructura metalográfica está conformada principalmente por partículas aciculares de silicio eutéctico relativamente largas.

En la probeta 2 (figura 70) se muestra la estructura metalográfica obtenida después del tratamiento térmico de solución a 538 °C y temple en agua a temperatura ambiente, en esta muestra se observa como las partículas de silicio eutéctico empiezan a dividirse y comienzan a redondearse.

En la probeta numero 3 (figura 70) observamos la estructura metalográfica de la probeta de aleación de aluminio 356 sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 0 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas, en esta muestra podemos ver que el silicio eutéctico esferoidiza en partícula pequeñas.

En la probeta 4 (figura 70) sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 12 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas, podemos observar que la estructura metalográfica está conformada mayormente por partículas de silicio eutéctico en forma de esferas pequeñas y fibras relativamente gruesas y redondeadas.

En la probeta 5 (figura 70) sometida a tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 20 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas, se observa un mayor engrosamiento de las partículas aciculares y las de forma esferoidal de silicio eutéctico.

El la probeta numero 6 (figura 71) sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 155 °C durante 6 horas, en esta muestra se observa que el silicio eutéctico se encuentra mayormente en partículas en forma de esferas.

En la probeta 7 (figura 71) sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 170 °C durante 6 horas, se puede ver que se comienzan a formar de nuevo partículas aciculares de silicio eutéctico relativamente largas y redondeadas así como una reducción en el tamaño de las esferas.

En la probeta 8 (figura 71) sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 170 °C durante 6 horas, se observa un ligero alargamiento de las partículas aciculares redondeadas de silicio eutéctico.

En la probeta numero 9 (figura 71) sometida a tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente a envejecimiento artificial a 236 °C durante 6 horas, se observa un parecido a la estructura metalográfica de la probeta número 2 (figura 71) solo que en esta las partículas de silicio eutéctico son más gruesas.

CONCLUSIONES.

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede concluir lo siguiente:

1. Qué el tratamiento térmico de envejecimiento tanto natural como artificial mejora las propiedades físico-mecánicas de la aleación de aluminio 356.
2. Que el tratamiento térmico de envejecimiento natural y artificial modifica básicamente la estructura metalográfica de la aleación de aluminio 356., obteniéndose en condiciones adecuadas un tamaño de cristales de silicio más pequeños y redondeados lo cual puede ser benéfico en la elevación de ciertas propiedades mecánicas
3. El tratamiento de solución modifica la estructura metalográfica de la aleación de aluminio pero al no darle tratamiento de envejecimiento no se logra la precipitación de silicuro de magnesio (partículas submicroscópicas) y por lo tanto no se tiene el efecto de servir como barrera al paso de dislocaciones y elevar las propiedades físico-mecánicas.
4. La variación del valor de las propiedades físico-mecánicas reportadas en el presente trabajo como son la dureza y propiedades tensiles con respecto a los tratamientos térmicos a los que fueron sometidas las probetas, tomando como base los valores promedio obtenidos en la tabla 9, mostraron un comportamiento irregular y fue como sigue:

Probeta 5 > probetas 7 y 8 > probetas 3 y 4 > probeta 6 > probetas 1, 2 y 9.

5. El tratamiento térmico de envejecimiento que mejor combinación de propiedades proporciona consiste en tratamiento térmico de solución a 538 °C, temple en agua a temperatura ambiente, 20 horas de envejecimiento natural y posteriormente a envejecimiento artificial a 185 °C durante 6 horas.

6. El tratamiento térmico de envejecimiento que produce la más pobre combinación de propiedades físico-mecánicas es el que consiste en tratamiento térmico de solución a 538°C, temple en agua a temperatura ambiente y posteriormente envejecimiento artificial a 236 °C durante 6 horas.

7. Los resultados de las propiedades físico-mecánicas determinadas a cada probeta se corresponden con las estructuras metalográficas obtenidas, pudiéndose apreciar claramente las diferencias estructurales, así como de comportamiento mecánico entre las diferentes temperaturas y tiempos de envejecimiento tanto natural como artificial.

En base a los resultados obtenidos de este trabajo se puede concluir que el objetivo planteado al inicio de esta tesis se cumplió ya que se pudieron observar los diferentes efectos de los tratamientos térmicos de solución y envejecimiento en la estructura y propiedades de la aleación de aluminio 356 en función del tiempo y la temperatura, así como las mejores combinaciones de estas variables para obtener la mejor configuración de propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFIA.

- Manufactura, ingeniería y tecnología, Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven R. Pearson Prentice Hall, 4ª ed. 2002.
- Metalurgia General Volumen II, F. R. Morral, E. Jimeno y P. molera, Editorial Reverté, S. A., 1985, reimpresión: julio 2004.
- Análisis Químico, Herbert A. Lattinen, Walter E. Harris, Editorial Reverté, S. A., 1982.
- Tecnología de los oficios metalúrgicos, A. Leyensetter, Editorial Reverté, S. A., 1984 reimpresión: Abril 2006.
- Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé, 4ª ed. editorial Thomson, 2004.
- Metals Handbook, vol. 7 Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, 8th Ed. American society for Metals.
- ASTM-E-3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.
- Metals Handbook, vol. 2 heat treating, Cleaning and finishing, 8th Ed. American society for Metals.
- An Introduction to the solidification of Metals, Winegard W. C. London, 1964.
- Rev. Metal. CENIM. Vol. 9 num. 5 1973.
- Casting Kaiser Aluminium, 1ª. Ed. 1956.